



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Auscultación de la erosión en un terraplén experimental mediante la tecnología escáner láser terrestre

Treball realitzat per:

Carolina Suárez Matarrita

Dirigit per:

Marcel Hürlimann

Càrol Puig

Màster en:

Ingeniería del Terreno

Barcelona, **junio** del 2019

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Resumen

El cambio climático y las modificaciones en el equilibrio dinámico que provoca en la Tierra, varían las condiciones del medio ambiente, y trae consecuencias en las interacciones suelo - vegetación - atmósfera, con importantes implicaciones en las actividades humanas.

El proyecto SMuCphy dirigido por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña, tiene como objetivo estudiar, en un terraplén experimental, las interacciones de los elementos atmosféricos en condiciones naturales con el suelo, como causa principal de la erosión del suelo, en el marco del cambio climático.

El presente estudio tiene como objetivo estudiar el proceso erosivo del terraplén experimental para la cuantificación de la pérdida de suelo, esto se realiza con la utilización de datos de campo, análisis de las precipitaciones, uso tecnología lidar y la implementación de un modelo empírico de erosión.

Cada cierto periodo de tiempo el material erosionado acumulado en la parte inferior del talud sobre una canaleta fue recolectado, pesado y analizado en el laboratorio, en general se caracteriza como arenas finas.

Las precipitaciones fueron clasificadas en eventos de lluvia no erosivos y erosivos, se estos últimos se obtuvo parámetros de intensidad máxima, energía cinética y el índice de erosión, para ser comparados con la cantidad de material recolectado. Entre los meses de agosto a noviembre, se observa la mayor capacidad erosiva, y de diciembre a marzo, la menor.

La utilización del escáner laser terrestre, únicamente en el talud no vegetado, permite un análisis milimétrico del comportamiento del talud, calculando distancias entre nubes de puntos diferentes y el cambio del volumen. En general, se observa una textura bandeada de desgaste y acumulación del material dentro del talud.

El modelo empírico de erosión RUSLE, indica mayor erosión en el talud no vegetado que en el talud vegetado, esto coincide con los datos de campo en ordenes de magnitud similares. Y el factor de erosividad de la lluvia también coincide con los datos teóricos de las zonas erosivas de Europa, siendo la zona mediterránea que presenta la mayor erosión.

Abstract

Climate change and changes in the dynamic balance, causes on Earth, modifications on the environmental conditions, and has consequences in soil-vegetation-atmosphere interactions, with important implications for human activities.

The SMuCphy project directed by the Department of Civil and Environmental Engineering of the Polytechnic University of Catalonia is to study the interactions of the atmospheric elements in natural conditions with the soil, as the main cause of soil erosion, in the context of climate change, in an experimental embankment.

The present research aims to study the erosion process of the experimental embankment for the quantification of soil loss, with the use of field data, rainfall analysis, 3D technology and the implementation of an empirical model of erosion.

Every certain period the eroded material accumulated on a gutter in the lower part of the slope. The eroded material was collected, weighed and analyzed in the laboratory, which is characterized as fine sands.

Rainfall information was classified in non-erosive and erosive rain events, and then calculated parameters of maximum intensity, kinetic energy and erosion index, to be compared with the amount of material collected. Between the months of August to November, the greatest erosive capacity is observed, and from December to March, the lowest.

The terrestrial laser scanner used only in the non-vegetated slope, allows a millimeter analysis of the behavior of the slope, calculating distances between clouds of points of different fields and the volume change. In general, a banded texture of wear and accumulation of the material inside the slope is observed.

The empirical RUSLE erosion model indicates greater erosion in the non-vegetated slope than in the vegetated slope, this coincides with the field data in orders of similar magnitude. And the rain erosivity factor also coincides with the theoretical data of the erosive zones of Europe, being the Mediterranean area that presents the greatest erosion.

Índice de Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos.....	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Erosión y precipitaciones	5
2.2 Escáner lidar terrestre	9
2.3 Modelo de erosión	13
2.4 Descripción del terraplén	16
3. METODOLOGÍA.....	19
3.1 Auscultación	19
3.2 Análisis de precipitaciones	21
3.3 Escáner Lidar Terrestre	25
3.4 Modelo de erosión	30
4. RESULTADOS	34
4.1 Auscultación	34
4.1.1 Caracterización del material	34
4.1.2 Cuantificación de la erosión del suelo	35
4.2 Análisis de precipitaciones	40
4.3 Escáner Lidar Terrestre	48
4.3.1 Análisis y cálculo de diferencias en el talud Norte	49
4.3.2 Análisis y cálculo de diferencias en el talud Sur	56
4.3.3 Cálculo de volumen en el talud Norte	61
4.3.4 Cálculo de volumen en el talud Sur	63
4.2.5 Comparación general	65
4.4 Modelo de erosión: RUSLE	71
5. CONCLUSIONES.....	75
5.1 Auscultación	75
5.2 Escáner láser terrestre	76
5.3 Modelo de erosión	77
5.4 Recomendaciones.....	77

BIBLIOGRAFÍA	79
ANEXOS	82
Anexo 1: Humedad natural	82
Anexo 2: Granulometría	83
Anexo 3: Datos generales de precipitaciones	85
Anexo 4: Cálculo de Volumen	87

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación del Parc UPC Agropolis en Viladecans, Delta de Llobregat. Barcelona.	17
Figura 2. Distribución de las partes del terraplén. (Oorthuis et al., 2018)	18
Figura 3. Lado norte del terraplén con la instrumentación colocada el 22 de marzo del 2018.	19
Figura 4. a) Estructura utilizada para la recolección de sedimentos. b) Muestra de sedimentos acumulados en la canaleta.	20
Figura 5. Muestras en el laboratorio	21
Figura 6. Ejemplo de eventos de lluvia en un periodo de 4 días.	22
Figura 7. Número de eventos de lluvia por mes. Total: 55 eventos.	23
Figura 8. Escáner Laser Terrestre modelo ILRIS-3D y dianas de puntos de control.	25
Figura 9. Esquema de flujo de trabajo con TLS.	26
Figura 10. Tratamiento de nubes de puntos. a) Nube de puntos completa de la captura de datos. b) el área de estudio delimitada.	27
Figura 11. Modelo 3D del talud norte en la campaña del 12 de abril del 2018. (a) Visualización con escala de colores por intensidad de rebote del láser. (b) Visualización con colores reales.	28
Figura 12. Ejemplo de alineación de dos nubes de puntos.	29
Figura 13. Curva granulométrica del material erosionado.	35
Figura 14. Cantidad de sedimentos recolectados en cada talud del terraplén por periodos. La simbología indica la primera recolección de material posterior a la instalación de la canaleta.	37
Figura 15. Gráfica de tasa de pérdida de suelo ocurrida en cada periodo.	38
Figura 16. Índice de área foliar en comparación con la pérdida de suelo de lado vegetado del talud.	40
Figura 17. Gráfico resumen de la lluvia total, intensidad máxima de intervalos de 30 minutos y energía cinética, para cada evento.	42
Figura 18. Cantidad de lluvia y su intensidad máxima para cada evento.	45

Figura 19. Relación peso erosionado por día con la intensidad de cada evento dentro de cada periodo.....	45
Figura 20. Cantidad de lluvia y su energía cinética para cada evento.....	46
Figura 21. Relación peso erosionado por día con la energía cinética de cada evento dentro de cada periodo.....	46
Figura 22. Tasa de erosión para cada talud del terraplén.	48
Figura 23. Fotografía y su respectivo modelo 3D.	49
Figura 24. (a) Fotografía del talud norte el 12 de abril del 2018. (b) Modelo 3D.....	50
Figura 25. Modelo 3D del talud norte. Fecha del 30 de octubre del 2018	51
Figura 26. (a) Fotografía del talud norte el 10 de diciembre 2018. (b) Modelo 3D.....	52
Figura 27. (a) Fotografía del talud norte el 8 de marzo del 2019. (b) Modelo 3D.....	53
Figura 28. Cambios en un periodo de 207 días entre las fechas 12 de abril y 30 de octubre del 2018.	54
Figura 29. Cambios en un periodo de 41 días entre el 30 de octubre y el 10 de diciembre del 2018.	55
Figura 30. Cambios en un periodo de 88 días entre las fechas del 10 de diciembre del 2018 al 8 de marzo del 2019.....	55
Figura 31. (a) Fotografía del talud sur el 12 de abril del 2018. (b) Modelo 3D.....	56
Figura 32. Modelo 3D del talud sur, el 30 de octubre del 2018. (a) Visualización con intensidad de rebote del láser. (b) Visualización con colores reales.	57
Figura 33. (a) Fotografía del talud norte el 10 de diciembre del 2018. (b) Modelo 3D.....	58
Figura 34. (a) Fotografía del talud norte el 8 de marzo del 2019. (b) Modelo 3D.....	59
Figura 35. Cambios en un periodo de 207 días entre las fechas 12 de abril y 30 de octubre del 2018.	59
Figura 36. Cambios en un periodo de 41 días entre el 30 de octubre y el 10 de diciembre del 2018.	60
Figura 37. Cambios en un periodo de 88 días entre las fechas del 10 de diciembre del 2018 al 8 de marzo del 2019.....	61
Figura 38. Modelo 3D de diferencias de volumen en el periodo del 12 de abril al 30 de octubre del 2018.	62
Figura 39. Modelo 3D de diferencias de volumen en el periodo del 30 de.....	62
Figura 40. Modelo 3D de diferencias de volumen en el periodo del 10 de diciembre del 2018 al 8 de marzo del 2019.....	63
Figura 41. Modelo 3D de la diferencia de volumen del 12 de abril al 30 de octubre del 2018.	64
Figura 42. Modelo 3D de la diferencia de volumen del 30 de octubre al 10 de diciembre del 2018.	64
Figura 43. Modelo 3D de la diferencia de volumen del 10 de diciembre al 8 d marzo del 2019.	65
Figura 44. Talud norte. (a) Estado inicial el 12 de abril del 2018. (b) Estado final el 8 de marzo del 2019.	66

Figura 45. Comparación del talud norte entre el 12 de abril del 2018 y el 8 de marzo del 2019. (a) Diferencias de distancias entre nubes de puntos. (b) Cambio de volumen.	67
Figura 46. Talud Sur. (a) Estado inicial el 12 de abril del 2018. (b) Estado final el 8 de marzo del 2019.	68
Figura 47. Comparación del talud sur entre el 12 de abril del 2018 y el 8 de marzo del 2019. (a) Diferencias de distancias entre nubes de puntos. (b) Cambio de volumen.	69
Figura 48. Perfil de comprobación de diferencias de distancias entre nubes de puntos.....	70
Figura 49. Material erosionado no incluido en los datos de campo.	71
Figura 50. Factor R de erosividad mensual.	72
Figura 51. Comparación de resultados de campo, modelo RUSLE, CloudCompare:	74

Índice de Tablas

Tabla 1. Periodos de análisis de precipitaciones, recolección de sedimentos y campañas lidar.	20
Tabla 2. Fechas de cada campaña y resolución de trabajo del TLS.	26
Tabla 3. Rango de variación de cada parámetro. (Hernando y Romano, 2010).....	33
Tabla 4. Clasificación básica de los suelos según el tamaño de partícula.	34
Tabla 5. Resumen tamaño de partículas de material erosionado por periodos.....	35
Tabla 6. Datos de sedimentos recolectados.	36
Tabla 7. Volumen de material erosionado.	37
Tabla 8. Datos del material erosionado por día.	38
Tabla 9. Eventos de lluvia por mes en un lapso de un año.	41
Tabla 10. Datos obtenidos de cada evento de lluvia considerado erosivo.	43
Tabla 11. Resumen de la representación de los eventos de lluvia en la precipitación total de cada periodo de estudio.	44
Tabla 12. Resumen de intensidades máximas, energía máxima y cantidad de material erosionad en cada periodo de estudio.	47
Tabla 13. Comparación datos obtenidos en CloudCompare y los datos de campo.....	71
Tabla 14. Resultados modelos RUSLE.	73
Tabla 15. Tabla de umbrales de erosión según Hernando y Romano (2010).....	74
Tabla 16. Número y abertura de tamices según ASTM.	83
Tabla 17. Datos mínimos y máximos de los parámetros de las precipitaciones	85
Tabla 18. Datos de cálculo de volumen talud norte.	87
Tabla 19. Datos de cálculo de volumen talud sur.....	88

Agradecimientos

Gracias al apoyo de toda mi familia
para esta experiencia académica y personal en Barcelona,
por enseñarme sobre constancia y disciplina
para cumplir los sueños.
Gracias a los profesores Marcel Hürlimann y Càrol Puig
por la guía en este proyecto de investigación
y todas las competencias aprendidas
para mi mejor desempeño en mi profesión y en la vida.

1.INTRODUCCIÓN

La Tierra a lo largo de toda su historia ha pasado por épocas de hielo y deshielo, sin embargo, en la actualidad se encuentra en una amenaza por el aumento acelerado de temperaturas que provocan el calentamiento global y con consecuencia directa en el cambio climático.

En el proceso de equilibrio dinámico de la naturaleza, el ciclo hidrológico es uno de los principales agentes que modifican el medio ambiente. La Tierra al estar en una amenaza constante y significativa por el cambio climático y las intervenciones antropogénicas, recibe consecuencias directas en la interacción suelo – vegetación – atmósfera, lo que provoca y acelera el proceso de erosión del suelo. El estudio de estas interacciones es fundamental para la correcta evaluación de deslizamientos inducidos por lluvias y otros procesos de pérdidas de masa.

Los suelos son el fundamento para el desarrollo de las actividades humanas, principalmente en la producción de alimentos y la seguridad alimentaria. Funcionan como el mayor filtro y tanque de almacenamiento de agua en la Tierra, lo que provee agua potable; contienen más carbono que toda la vegetación del planeta y regulan la emisión de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero (FAO, 2016).

La erosión del suelo y la sedimentación son procesos naturales, pero con gran sensibilidad a la influencia humana, por esto la erosión anual de algunas zonas modificadas

por actividades humanas es mayor que la que presentaba en condiciones de equilibrio natural. Sin embargo, con la aceleración del cambio climático este también es una causa importante para el aumento de la erosión.

Debido a estas razones, la erosión del suelo por el agua es clasificada como uno de los principales problemas ambientales en el mundo (Pimentel, 2016) y se cuenta entre las ocho amenazas del suelo enumeradas en la Estrategia Temática de Suelos de la Comisión Europea (CE, 2006). Sus consecuencias para la sociedad son tanto directas: contaminación del agua, pérdida de suelos agrícolas y forestales, como indirectas: muertes de seres vivos, daños a infraestructuras y disminución de la capacidad de embalses, estas últimas debidas a flujos con alta concentración de sedimentos (flujos torrenciales).

El presente estudio forma parte del proyecto “*Slope mass-wasting under climate change. Physical mechanisms, predictive modelling and possible mitigation strategies*” llamado por sus siglas en inglés SMuCphy, por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña. Es un trabajo multidisciplinar con el propósito de investigar las interacciones del suelo y los elementos atmosféricos en condiciones naturales, y sus consecuencias y peligros geológicos – geotécnico causados, específicamente por la erosión de suelos debido al cambio climático, con el fin de proponer estrategias de adaptación y mitigación (SMuCPhy, 2017).

Como parte del proyecto “SMuCphy” diferentes autores han participado en diferentes fases desde el diseño del terraplén hasta el estudio de las condiciones termo – hidro – mecánicas. Oothuis (2016) explica el diseño y la construcción del terraplén, la correcta elección de los sensores y su lugar de instalación, así como la elección de la pendiente necesaria para que se produzcan pequeñas roturas y poder monitorizarlas. Cevallos (2017), llevó a cabo la supervisión de la construcción del terraplén, la caracterización del suelo utilizado, la calibración y colocación de la instrumentación para monitorizar el comportamiento de las laderas y el análisis de las primeras medidas obtenidas con la instrumentación. Otros autores como, Guachizaca (2018) y Velásquez (2019) realizaron labores de análisis del comportamiento hidromecánico del terraplén

La importancia de este proyecto radica en la utilización de métodos novedosos para estudiar la respuesta de la interacción suelo – vegetación – atmósfera, en condiciones atmosféricas naturales no controladas, de un terraplén experimental a escala real con un lado vegetado y otro no vegetado.

El problema por investigar en este estudio es: ¿Cómo cuantificar la pérdida del suelo en el terraplén experimental, causado por las precipitaciones a lo largo del periodo 2018-2019, utilizando métodos de escáner laser terrestre, tratamiento de nubes de puntos 3D, y modelos simples de predicción de erosión del suelo? Posteriormente los datos registrados pueden ser útiles para validar y calibrar modelos a escala regional en otro estudio.

1.1 Objetivos

El objetivo general del presente Trabajo Final de Máster:

Estudiar el proceso erosivo del terraplén experimental para la cuantificación de la pérdida de suelo en el terraplén experimental mediante el uso del escáner laser terrestre y el análisis de las precipitaciones en el periodo 2018-2019.

Los objetivos específicos son:

- Analizar la erosividad de la lluvia para el estudio de su efecto en la pérdida de suelo del terraplén, mediante el tratamiento de datos de precipitaciones e identificación de los eventos erosivos.
- Recolectar los sedimentos acumulados en la parte inferior del talud para el cálculo de la erosión producida en diferentes periodos de tiempo mediante el registro de datos de campo.
- Crear modelos 3D para la realización de mapeos de zonas de desgaste o acumulación de sedimento en el talud, detección de cambios y comparaciones volumétricas de pérdida de suelos, mediante el software CloudCompare.
- Implementar un modelo de erosión simple en el terraplén para su comparación con los datos de campo, mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Erosión y precipitaciones

La erosión del suelo es un proceso mecánico de desprendimiento y el movimiento de las partículas del suelo causado por algún agente físico como el viento o el agua. El suelo es separado, transportado y depositado en otro lugar, por estos u otros agentes, este proceso se ve facilitado cuando no existe cobertura vegetal.

Si bien la erosión se puede controlar, es casi imposible detenerla por completo y se intensifica en terrenos inclinados (Renard, *et al.*, 2000), además, la formación de suelo ocurre a una velocidad muy lenta comparado con su pérdida. Esto reduce la productividad de los ecosistemas terrestres, aumentando el escurrimiento de agua y disminuyendo así la infiltración y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

Durante el proceso de erosión, la materia orgánica y los nutrientes esenciales de las plantas se eliminan y se reduce la profundidad del suelo. Estos cambios inhiben el crecimiento vegetativo y la presencia de la biodiversidad general en el suelo (Pimentel, 2006).

Como causa principal de los procesos erosivos, se consideran las precipitaciones, las cuales producen efectos en el modelado del terreno; inundaciones, deslizamientos y pérdida del suelo. Las gotas de lluvia, la forma más común de precipitación, pueden ser muy destructivas cuando golpean el suelo. Este impacto fomenta la aparición de escorrentía

superficial, y/o el desarrollo de flujos instantáneos de lodos o derrubios (Angulo y Beguería, 2009), facilitando el proceso denudacional del relieve.

De acuerdo con Gonzáles *et al.*, (2005), los resultados de los diferentes informes sobre el cambio climático indican que las áreas mayores perjudicadas son las zonas de transición, y dentro de éstas, especialmente, las de clima mediterráneo, en el cual existen predicciones que indican el descenso de los totales anuales y el incremento de la variabilidad de las precipitaciones. El problema de tales cambios es que tendrían lugar en ambientes donde el agua es un recurso escaso y limitado que determina muchos procesos de los sistemas naturales y su pervivencia, así como numerosas actividades humanas.

Las precipitaciones del tipo mediterráneo se caracterizan por su escasez, su torrencialidad y extrema variabilidad espacial y temporal. Además, el grado de concentración de la precipitación anual es sumamente elevado en estos ambientes y es posible que un simple evento de lluvia pueda alcanzar valores comparables a los totales mensuales, de tal manera que los valores estacionales pueden ocultar realmente la influencia de un corto número de días de lluvia. Por lo tanto, un cambio en las precipitaciones, aunque sea en un corto número de días, se puede convertir en un proceso de la máxima relevancia que afectaría tanto a los sistemas naturales como a las actividades humanas (Gonzáles *et al.*, 2005).

Se debe mencionar que la concentración de la lluvia en un reducido número de eventos es la causa principal de la concentración de la erosión en el tiempo, fenómeno más que notable en áreas de clima mediterráneo (González *et al.*, 2005).

En la zona del Mediterráneo, se encuentra en uno de los sectores con mayor densidad de ciclogénesis del mundo, extremadamente móviles en el espacio y dinámicas en su desarrollo interno, que se manifiestan sobre extensiones que oscilan entre los 10 y los 50 km², como resultado se presenta la alta variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones y en consecuencia de los eventos extremos (González *et al.*, 2005).

En general, como las precipitaciones en los climas mediterráneos se caracterizan por una gran variabilidad temporal y una intensidad alta, esto influye directamente a la erosividad de la lluvia, que aumenta con la mayor ocurrencia de pocos eventos muy intensos. Esta característica representa la energía con que las gotas impactan el suelo a determinada intensidad para romper los agregados superficiales en partículas de tamaño transportable; se da en función de la energía cinética (relaciona el tamaño y la velocidad de caída de las gotas) y de la intensidad de la precipitación (relaciona la cantidad con la duración), (Angulo, 2009). Las gotas de lluvia producen un taponamiento de los poros del suelo que incide en el aumento de la escorrentía y como consecuencia, la erosión.

El estudio de los procesos erosivos de los suelos causados por las precipitaciones se debe realizar partir de las condiciones originales geomorfológicas, geológicas, geotécnicas, climatológicas y de vegetación; del análisis del balance hídrico del sitio: precipitación,

escorrentía, evapotranspiración e infiltración. Todos estos se suman a la caracterización de la erosividad, erodibilidad y erosionabilidad, de las cuales la primera indica la capacidad potencial de la lluvia para provocar erosión, el siguiente analiza la susceptibilidad del terreno a la erosión, de los cuales depende de sus características físicas y químicas, como el uso del suelo e intervenciones a la que es expuesta y, por lo tanto, la erosionabilidad es cuán erosivo puede ser un sitio en función de las características ya descritas.

Por eso, es importante tener en cuenta la interacción suelo - vegetación - atmósfera (SVA) medidos mediante la instrumentación adecuada junto con la utilización de herramientas de tecnología 3D y modelos matemáticos que integran diferentes factores para la predicción de la erosión y que se puedan utilizar de manera local y regional.

Los registros obtenidos proporcionan datos de entrada esenciales para el modelado, calibración y validación de la interacción SVA. Oorthudis *et.*, (2018) indica que la comprensión y análisis de estas interacciones son fundamentales para la evaluación de procesos erosivos como deslizamientos inducidos por lluvias u otros procesos de pérdida de masa en pendientes, siendo este el más importante y peligroso en regiones montañosas.

Con el estudio de las interacciones SVA sobre un terraplén experimental debidamente instrumentado y controlado en condiciones atmosféricas naturales, se logra entender con detalle los procesos termo hidromecánicos que se manifiestan en el terraplén y cuantificar la erosión a la que ha sido afectada (Oorthuis *et al.*, 2018).

La importancia de esta metodología radica en que se pueden extrapolar los resultados y procedimientos del modelo a escala de ladera para la calibración de los modelos a nivel regional de las pendientes naturales de los Pirineos, sobre el control de la erosión y la estabilidad de taludes en zonas susceptibles. Las áreas montañosas, incluidos los Pirineos o los rangos costeros catalanes se componen por una capa de suelo poco profunda sobre un lecho de roca impermeable, esta es una condición muy común, donde en el pasado se produjeron fallas inducidas por la lluvia de múltiples pendientes (Oorthuis *et al.*, 2018).

2.2 Escáner ládar terrestre

El escáner laser terrestre (*Terrestrial Laser Scanner* - TSL) es una tecnología de captura de imágenes en 3D a nivel del suelo sobre un trípode, la adquisición de datos se hace a partir de la medición de distancias y ángulos, por medio de un rayo de luz láser.

Los métodos láser son técnicas de teledetección en las que se calcula la distancia existente entre el equipo de medición y el terreno mediante la medición del tiempo que tarda el pulso láser en alcanzar una superficie y volver de nuevo al equipo (Azañon y Lamas, 2015). El TLS calcula la posición en función de la intensidad de la señal reflejada, por lo tanto, depende de las propiedades físicas del rayo, su coherencia espacial, la distancia y el ángulo de incidencia del rayo láser respecto del objeto observado y además de las propiedades reflectoras de la superficie de la estructura como el color y textura.

Tienen diferentes aplicaciones en la ingeniería debido a las precisiones alcanzadas, se utilizan para la modelización de estructuras con diferentes fines como la planificación urbana, evaluaciones geológicas, estudios forestales, análisis de vegetación y de erosión como levantamientos topográficos, tomando en cuenta registro de coordenadas, tipo de dianas y el efecto del ángulo y la distancia del escaneo.

Algunas ventajas del escáner laser terrestre son: la captura masiva de datos 3D, la precisión y la exactitud, la rapidez en la toma de datos y la obtención de densas nubes de puntos, por lo tanto, esta técnica podría complementar o sustituir a otras de imágenes como la fotogrametría terrestre.

Mediante esta herramienta se crean nubes de puntos y se construyen modelos 3D que permiten un análisis preciso, para realizar la comparación de imágenes de la misma estructura en etapas diferentes y observar los cambios ocurridos en este, de esta manera se obtiene el cálculo de distancia entre nubes y volumen, entre otros. El registro de nubes requiere utilizar dianas alrededor de la estructura en estudio para materializar los puntos de control. Cada fabricante tiene sus propias dianas y el software de cada TLS está ya programado para reconocerlas.

El escáner láser terrestre y las técnicas fotogramétricas se utilizan cada vez más para rastrear la evolución de las superficies naturales en 3D con una resolución y precisión sin

precedentes, por esta razón es comúnmente utilizado para el estudio de pérdida de suelo, a nivel local y regional.

Para el tratamiento y análisis de los datos adquiridos por medio del TLS se utiliza el software CloudCompare versión 2.10.alpha (2018). Es un software de procesamiento de nubes de puntos 3D. Se diseñó principalmente para realizar una comparación entre dos nubes de puntos 3D densas o entre una nube de puntos y una malla triangular, que incluye algoritmos de procesamiento avanzados. Se basa en una estructura específica de *octree* dedicada a esta tarea (Jafari *et al.*, 2017). Los algoritmos más comunes para medir las distancias entre las nubes de punto, es el *Cloud to Cloud* (C2C) y el *Multiscale Model to Model Cloud Comparison* (M3C2).

El *Cloud to Cloud* (C2C) es un método de comparación 3D rápido y simple, debido a que no requiere mallado o cálculo de superficies en la normal. Este aplica una estructura *octree* para dividir los espacios 3D y posteriormente encuentra los puntos más cercanos en las dos nubes registradas y cálculo su distancia (Jafari *et al.*, 2017). La desventaja de este método es su sensibilidad al ruido, ya que no consideran la orientación local de las superficies representadas por el punto.

El método *Multiscale Model to Model Cloud Comparison* (M3C2) se basa en el conjunto de puntos centrales que son una sub-muestra de la nube de referencia. Calcula la

distancia local entre dos nubes de puntos a lo largo de la dirección de la superficie normal que rastrea las variaciones 3D en la orientación de la superficie, con un cilindro de diámetro d y eje (i, N) (i es el punto central y N es la normal a escala d). El proceso de cálculo se acelera por el uso de los puntos centrales, ya que estos son subconjuntos de la nube de puntos de referencia confianza (Lague *et al.*, 2013).

El algoritmo M3C2 requiere dos parámetros definidos por el usuario, que son la escala normal (D) y escala de proyección (d). La escala normal se basa en la densidad y rugosidad de la nube de puntos de referencia. La escala de proyección se utiliza para calcular las distancias entre dos nubes de puntos y es determinada por el radio y la longitud definidos de un cilindro de proyección. Una vez que la normal es definida para un punto central, proyecta el punto en cada nube en la escala de proyección mediante la definición de la posición promedio de los puntos en la vecindad de cada conjunto de datos. Ambos conjuntos de datos existen dentro del cilindro de proyección y se promedian espacialmente para calcular la media de las posiciones superficiales de puntos a lo largo de la dirección normal. El promedio local alrededor de cada punto reduce aún más la influencia de la rugosidad de la superficie (Lague *et al.*, 2013).

Se debe considerar que no hay dos nubes de puntos iguales de una misma superficie, tomadas con el mismo equipo desde la misma posición, esto explica la importancia de realizar el análisis de superficie preferentemente al análisis punto a punto. Se estima para cada medición de distancia un intervalo de confianza dependiendo de la nube de puntos rugosidad

y error de registro (Jafari *et al.*, 2017). Entre sus principales ventajas se encuentran: es preciso, no requiere mallado, opera en 3D y estima localmente un intervalo de confianza (Lague *et al.*, 2013).

La ventaja de M3C2 sobre C2C se debe, por lo tanto, a los procesos de muestreo y promediado más sofisticados que mitigan los efectos del ruido y de los valores atípicos en las nubes de puntos. Por lo tanto, en este proyecto se realizarán los análisis de comparación de nubes de puntos utilizando el algoritmo M3C2.

Otra herramienta importante para el análisis de nubes de puntos y modelos 3D es la herramienta *2.5D Volume*, que realiza el cálculo de diferencias de volumen entre dos nubes de puntos o una nube de puntos y un plan o arbitrario, basado en un proceso de rasterización de la nube. Los parámetros que se utilizan son: la dirección de proyección, el espaciado y la altura de las celdas, para este último se puede elegir usar el mínimo, el promedio o la altura máxima. Para calcular el volumen el programa suma la contribución de cada celda, y las celdas vacías se ignoran. Finalmente, se obtiene un reporte estadístico con el volumen total y la superficie base, el porcentaje de celdas que coincidan, este debe ser alto para un resultado óptimo.

2.3 Modelo de erosión

De acuerdo con Alatorre y Beguería (2009) hay diferentes modelos de erosión desarrollados, como por ejemplo EUROSEM, WATEM/SEDEM, RHINEFLOW y

PESERA. A pesar de la innovación en herramientas de modelización, existen dificultades para la utilización de los modelos de erosión, debido en parte a la heterogeneidad de las propuestas existentes, ya que cada uno tiene sus propios criterios y sus objetivos específicos, que no permiten su uso de forma general o la comparación entre ellos.

Los modelos empíricos se basan en la utilización de procedimientos de inferencia estadística (fundamentalmente de regresión) para su representación. Para ello se basan en la acumulación de información cuantitativa a partir de instalaciones experimentales y de monitorización en campo (Alatorre y Beguería, 2009).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE, por sus siglas en inglés) es un modelo de erosión empírico, desarrollada por Wischmeier (1978), como una metodología para la estimación de la erosión laminar en parcelas pequeñas (Hernando y Romana, 2010). Con el avance de la investigación, experimentos, datos y recursos disponibles, la comunidad científica continuó mejorando la USLE, lo que llevó al desarrollo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE, por sus siglas en inglés) que tiene la misma fórmula de la USLE, pero varias mejoras para determinar los factores:

Esta ecuación presenta la siguiente estructura:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad \text{Ec. 1}$$

Donde cada uno de los parámetros representa lo siguiente:

A: tasa de pérdida de suelo por unidad de superficie (t/ha.año).

R: índice de erosión pluvial (MJ.cm/ha.h.año).

K: parámetro de erosionabilidad del suelo o erodabilidad (t.h/MJ.cm).

L: parámetro de longitud del canal de erosión (adimensional).

S: parámetro de pendiente del reguero (adimensional).

C: parámetro de naturaleza de la superficie cultivada (adimensional).

P: parámetro de prácticas de conservación (adimensional).

Hernando y Romana (2010) indican que al adaptar esta ecuación de forma simplificada y extendida a taludes de obras lineales se eliminan los factores C y P que se relacionan específicamente con las tierras agrícolas, y se propone en su lugar un factor de control de erosión “VM” para ser utilizado en sitios de construcción. Este factor es el responsable de los efectos de todas las medidas de control de la erosión que pueden aplicarse en cualquier sitio, incluida la vegetación, los medios mecánicos y los productos químicos. Los factores L y S se combinan para formar LS, el factor topográfico, que depende de la longitud y la inclinación de la pendiente. Estos últimos dos factores propuestos son también adimensionales.

Por consecuente la ecuación utilizada para la elaboración del modelo de erosión en obras lineales presenta la siguiente estructura:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot VM \quad \text{Ec. 2}$$

Al determinar cada factor que afecta la erosión del talud, se identifican que las únicas partes que dependen de la actividad humana en la pérdida de suelo son el factor topográfico

LS y el factor de control VM, ya que dependen del tipo de corte que se realice y el mecanismo de protección. Esto se debe a que el factor de precipitación R y el factor de erodibilidad K se obtienen por datos obtenidos en campo de las condiciones naturales, ya sea del suelo o las precipitaciones y no puede ser alterado por las actividades del hombre.

2.4 Descripción del terraplén

El estudio a detalle se realiza en un terraplén artificial experimental a escala de ladera, ubicado en el ParcUPC Agrópolis, sobre la llanura de inundación deltaica del río Llobregat, a unos 20 km al suroeste del centro de Barcelona, Cataluña, España (Figura 1). De acuerdo con Oorthuis *et al.*, (2018), el terraplén mide 18 m de largo, 12 m de ancho y 3 m de alto, con un volumen total de aproximadamente 326 m³. Las laderas tienen una pendiente de 33,7°.

Tiene diferentes orientaciones (norte y sur) y cada una con coberturas de vegetación (con y sin vegetación), la capa de suelo de aproximadamente entre 50 y 70 cm de espesor y ha sido colocada sobre una geomembrana impermeable.



Figura 1. Ubicación del Parc UPC Agropolis en Viladecans, Delta de Llobregat. Barcelona.

El terraplén está construido con una arena arcillosa del delta del río Llobregat y está dividido en cuatro zonas diferentes (Figura 2):

1. Pendiente sur vegetado, (S.V).
2. Pendiente sur no vegetado, (S n.V).
3. Pendiente norte vegetado, (N.V)
4. Pendiente norte no vegetado, (N n.V). m

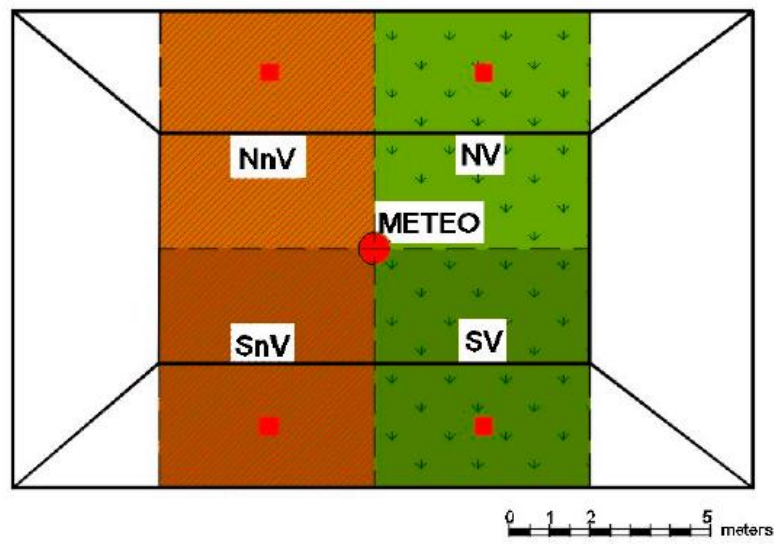


Figura 2. Distribución de las partes del terraplén. (Oorthuis *et al.*, 2018)

Cada una de las cuatro zonas está equipada con un perfil vertical de diferentes sensores, más los dispositivos que miden la escorrentía y la filtración de la superficie. Por lo tanto, es posible un análisis completo de la interacción SVA mediante la incorporación de observaciones recopiladas por la estación meteorológica (Oorthuis *et al.*, 2018). La fuente de alimentación de todo el sistema de monitoreo es proporcionada por paneles solares y baterías.

Los datos de todos los sensores se registran a una frecuencia de muestreo constante de 5 minutos, cada 24 horas, los archivos de datos se envían a través de FTP (File Transfer Protocol) al servidor universitario (Oorthuis *et al.*, 2018) (Figura 3). Esto permite un análisis y monitoreo de la interacción de SVA, factores que desempeñan un papel clave en la erosión del suelo.



Figura 3. Lado norte del terraplén con la instrumentación colocada el 22 de marzo del 2018.

3. METODOLOGÍA

3.1 Auscultación

Para la auscultación del terraplén, se procede a la recolección y caracterización del material erosionado a lo largo de un año desde el 22 de marzo del 2018 hasta el 8 de marzo del 2019.

El análisis de datos se divide cuatro en periodos, cada uno con una campaña de recolección de sedimentos y toma de datos lidar, como se observa en la Tabla 1, con un total de 351 días de monitoreo de la erosión. Las siglas ND significa No Datos, implican que para este periodo de tiempo no se recolectaron datos de campo.

Tabla 1. Periodos de análisis de precipitaciones, recolección de sedimentos y campañas lidar.

Periodo	Fecha inicio	Fecha final	Duración	Recolección de sedimentos	Campaña lidar
1	22/03/2018	15/10/2018	207	X	ND
2	15/10/2018	30/10/2018	15	X	X
3	30/10/2018	10/12/2018	41	X	X
4	10/12/2018	8/03/2019	88	X	X

El material erosionado, es depositado en la parte inferior del terraplén en una canaleta recubierta con un geotextil, que permite el paso del agua y la acumulación de los sedimentos sobre ésta (Figura 4 a). En cada campaña se realizan tareas de limpieza del geotextil en las cuatro zonas del terraplén, el material es recolectado dentro de bolsas plásticas y debidamente identificadas con fecha y ubicación del talud (Figura 4 b).

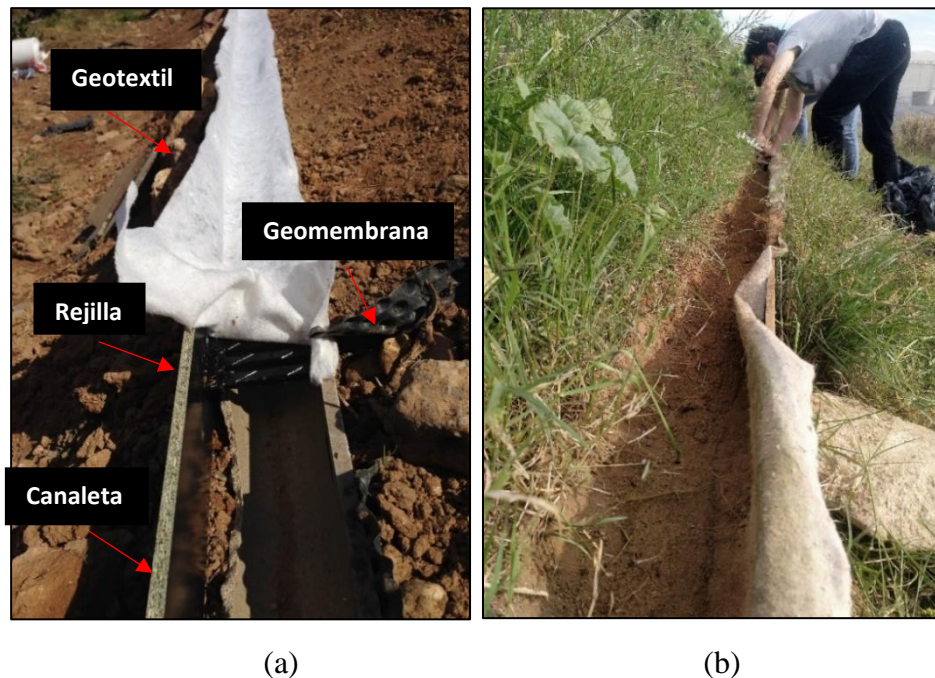


Figura 4. a) Estructura utilizada para la recolección de sedimentos. b) Muestra de sedimentos acumulados en la canaleta.

Posteriormente, el material es llevado al laboratorio de mecánica de suelos de la Escuela de Caminos en la Universidad Politécnica de Cataluña, para realizar diferentes análisis, entre ellos calcular el peso recolectado de cada talud (Figura 5), el peso húmedo, el contenido de humedad y el peso seco, todo de acuerdo a los procedimientos del anexo 1. Con los datos obtenidos se calcula el volumen del material utilizando una densidad aparente según Oorthuis *et al.*, (2018). Posteriormente, es analizado granulométricamente, de acuerdo al anexo 2.

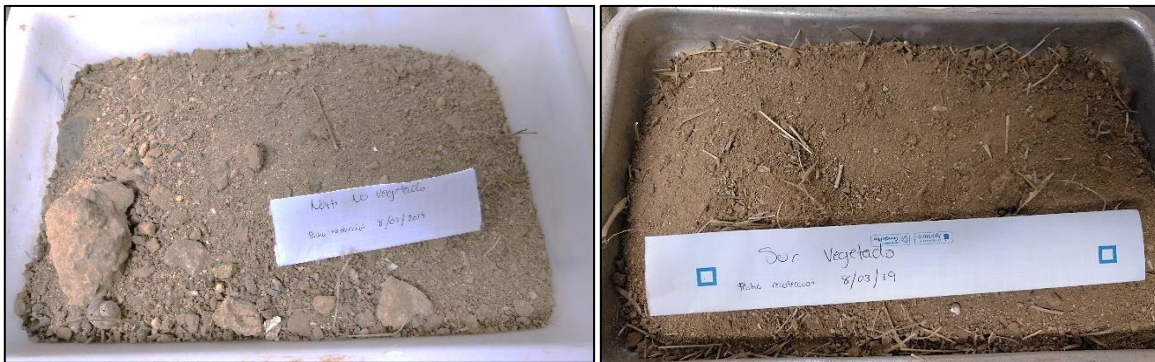


Figura 5. Muestras en el laboratorio

3.2 Análisis de precipitaciones

Una vez caracterizado el material erosionado, se realizan el análisis de las precipitaciones de acuerdo a la cantidad de eventos de lluvia a la que ha sido expuesto y a la intensidad y la energía cinética de estas.

El análisis de las precipitaciones se divide en los mismos periodos de tiempo de la recolección de material para comparar que grado de erosividad de la lluvia, el cual depende

de dos parámetros: la intensidad de la lluvia y la energía cinética. Para el cálculo de estos parámetros se deben identificar los eventos de lluvia que se consideran erosivos.

De acuerdo con Pastorello *et al.*, (2018), un evento de lluvia se identifica como el periodo de lluvia continua en donde no haya precipitación por una hora antes y después el evento (Figura 6). Al tratarse de un área con pendiente significativa, lo que implica facilidad de formación de escorrentía, se utilizaran solo los eventos con una precipitación total superior a 4 mm, para clasificarlos como eventos erosivos.

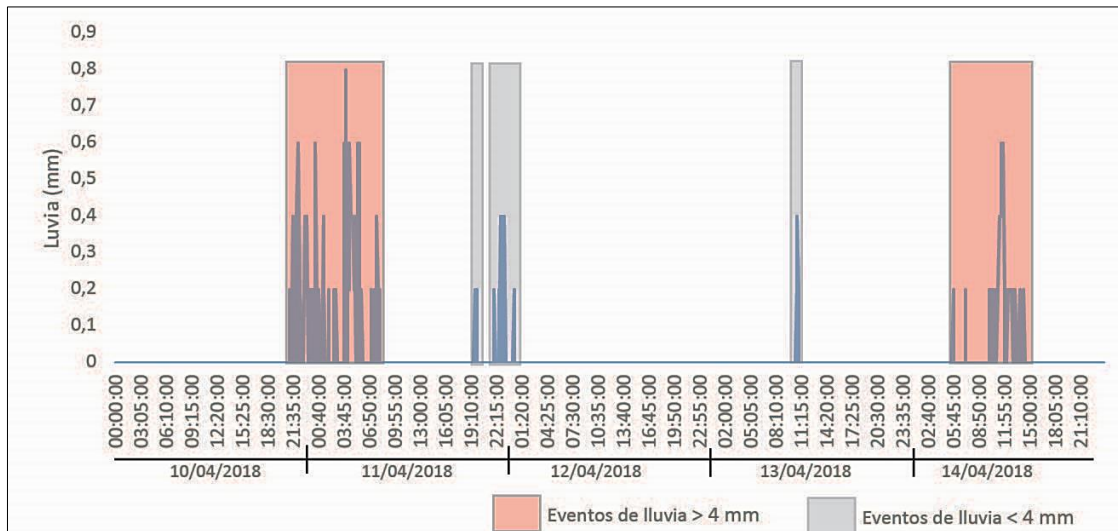


Figura 6. Ejemplo de eventos de lluvia en un periodo de 4 días.

Al identificar todos los eventos de lluvia que ocurrieron en un periodo de un año (Figura 7), se procede a calcular diferentes variables relacionadas con las características de precipitación para cada uno de los eventos considerados erosivos: precipitación total, intensidad máxima dentro de un período de 30 minutos durante el evento ($I_{30 \text{ max}}$), energía cinética total (E_k) y correspondiente índice de erosión ($EI_{\Delta t \text{ max}}$) (Pastorello *et al.*, 2018).

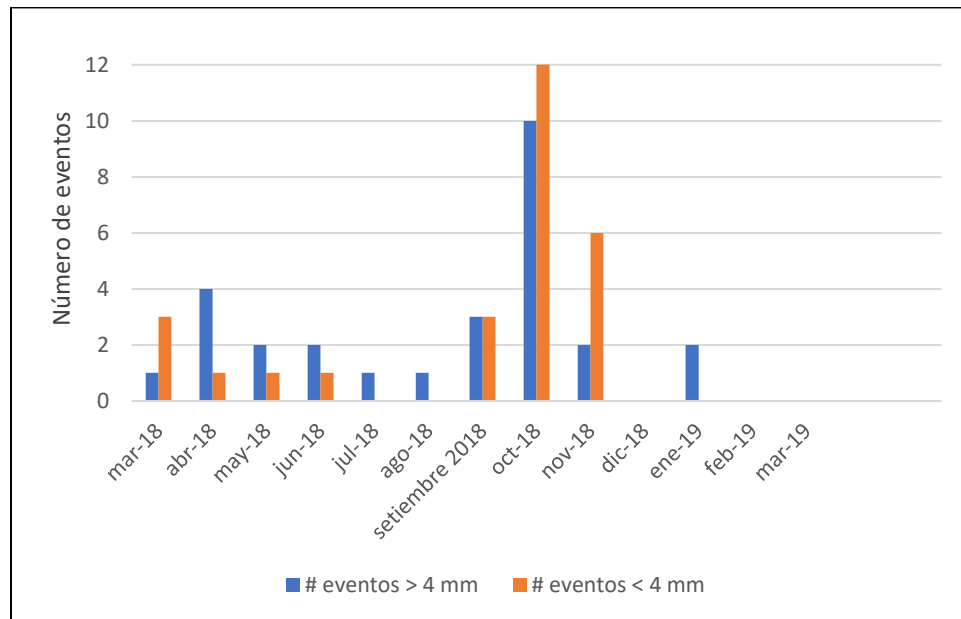


Figura 7. Número de eventos de lluvia por mes. Total: 55 eventos.

La intensidad de la lluvia se obtiene de la siguiente manera:

$$I_j = \frac{P_j}{T_j} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde,

I_j : intensidad de la lluvia (mm/h).

P_j : cantidad de lluvia de un segmento (mm).

T_j : tiempo de lluvia en un segmento (h).

Se debe medir el segmento con la mayor cantidad de lluvia en 30 minutos continuos, valor que representará la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}) expresada en mm/h.

La energía cinética de cada evento es la suma de la energía unitaria para cada segmento de tiempo, E , expresada en MJ/ha, por lo tanto, la energía cinética unitaria se calcula de la siguiente manera:

$$e_j = 0.119 + 0.0873 \log_{10} I_j \quad \text{Si, } I_j < 76 \text{ mm/h} \quad \text{Ec. 4}$$

$$e_j = 0.283 I_j \quad \text{Si, } I_j > 76 \text{ mm/h} \quad \text{Ec. 5}$$

en donde e_j es la energía cinética unitaria en MJ/ha mm, para el intervalo de tiempo j ; I_j es la intensidad de lluvia del intervalo, en mm/h. Para calcular la energía para un evento se usa la ecuación:

$$E = \sum e_j p_j \quad \text{Ec. 6}$$

en donde E es la energía cinética de un evento en MJ/ha y p_j es la lluvia para el intervalo de tiempo j en mm. El valor del índice de erosión o EI para el evento es:

$$EI = E * I_{30} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde I_{30} es la máxima intensidad del evento registrada en 30 minutos y se expresa en mm/h.

EI se expresa en MJ mm/ha h.

3.3 Escáner Ládar Terrestre

Se utiliza el escáner laser terrestre modelo ILRIS-3D que emite un rayo de luz laser de hasta 1500 m de largo. Los datos son transmitidos a una memoria USB para su posterior descarga y tratamiento.

Para cada escaneo se utilizan tres dianas fijas en el talud, que son colocadas sobre una varilla con base de concreto, en diferentes partes del terraplén, como se muestra en la Figura 8. Esto mantiene un objeto constante en el espacio entre periodos de estudio, con la función de optimizar la alineación entre nubes de puntos. La medición se realiza para cada orientación del talud a aproximadamente 20 m de distancia de este.



Figura 8. Escáner Laser Terrestre modelo ILRIS-3D y dianas de puntos de control.

En cada campaña se realiza el levantamiento en el talud norte y sur del terraplén. Posteriormente, los datos obtenidos son tratados con la herramienta tecnológica de

CloudCompare analizando únicamente la parte no vegetada de cada talud. El procedimiento general para la toma de datos con el TLS se muestra en la Figura 9.

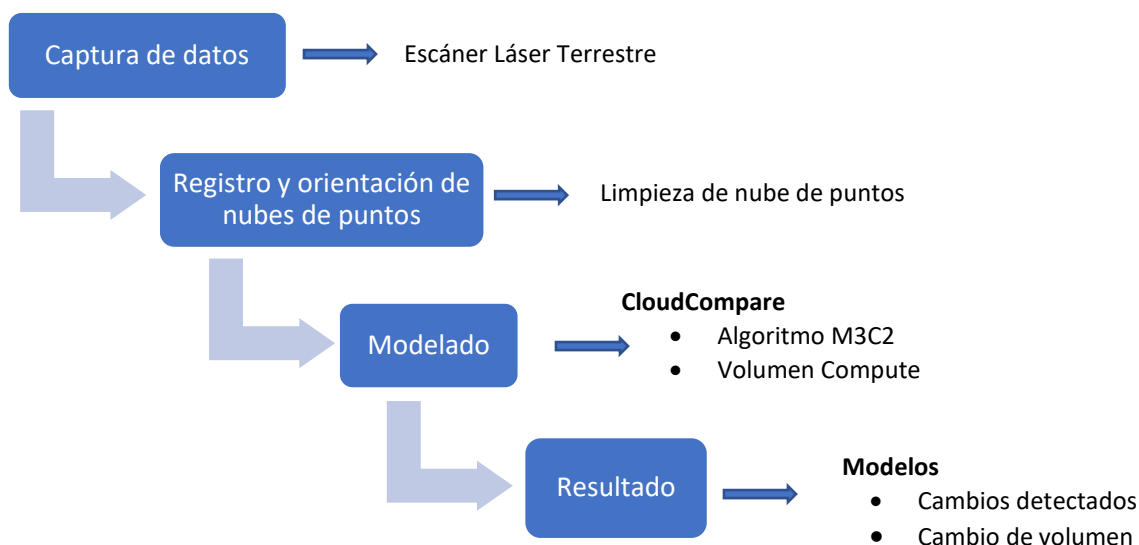


Figura 9. Esquema de flujo de trabajo con TLS.

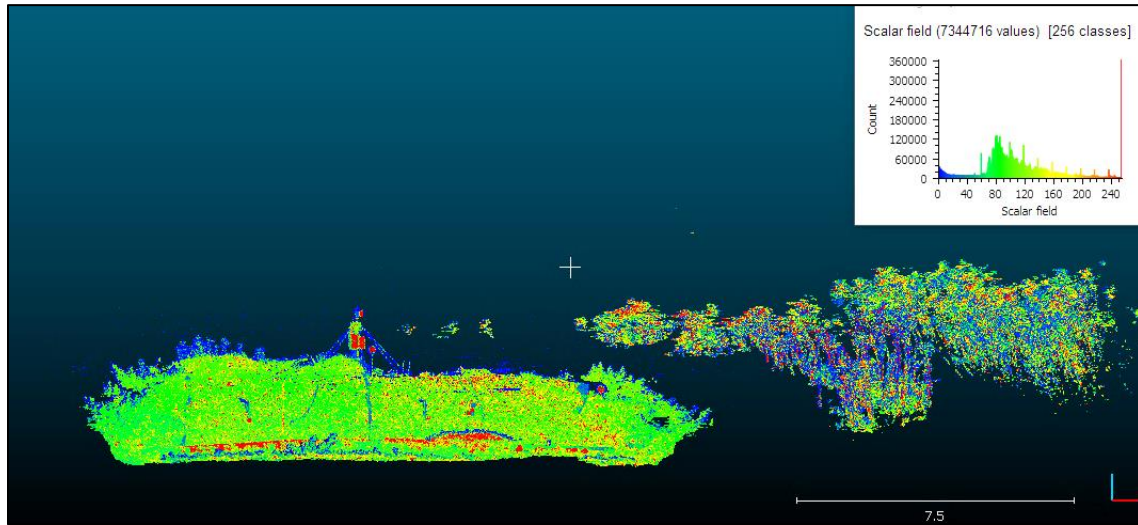
En la Tabla 2, se muestra la fecha de las campañas ejecutadas y la resolución utilizada en cada una, que se determina de manera manual dentro de un rango de 2,2 – 1,6 mm.

Tabla 2. Fechas de cada campaña y resolución de trabajo del TLS.

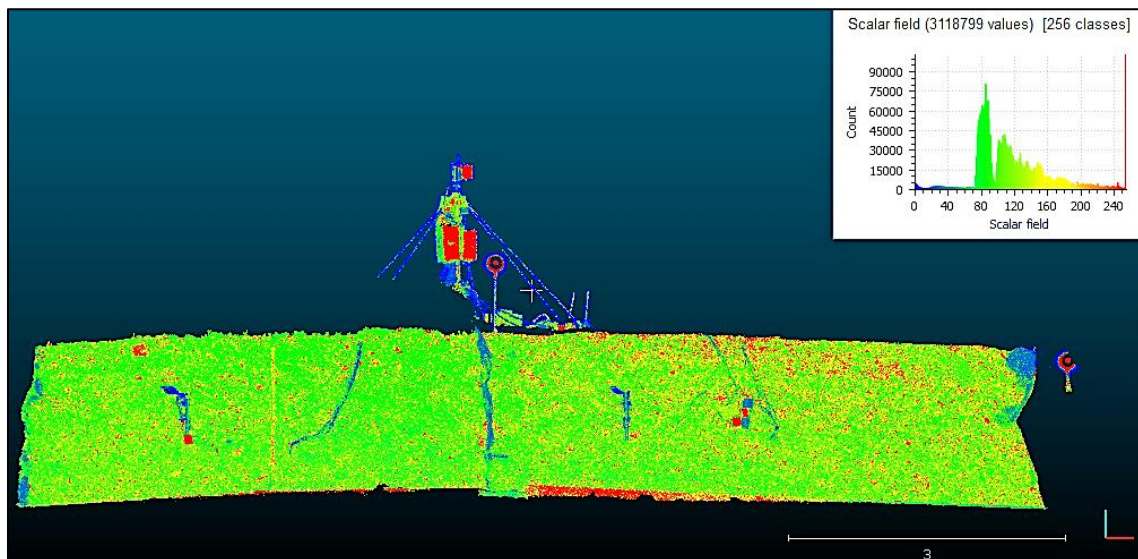
Fecha	Resolución	
	Talud Norte (mm)	Talud Sur (mm)
12/04/2018	1,9	2,2
30/10/2018	1,8	1,6
10/12/2018	1,7	1,6
8/03/2019	1,5	1,6

Una vez realizado el escaneo, se descarga la información a la computadora y se inicia el tratamiento de datos en el programa CloudCompare. Como primer paso, se delimitan las

imágenes a únicamente la zona de interés, eliminando el ruido en las nubes de puntos, se debe mantener nítida la forma de las dianas ya que a partir de ellas se realizan las alineaciones entre dos diferentes nubes de puntos. En la Figura 10 se muestran las nubes de puntos con la escala de colores de intensidad de rebote de la luz laser.



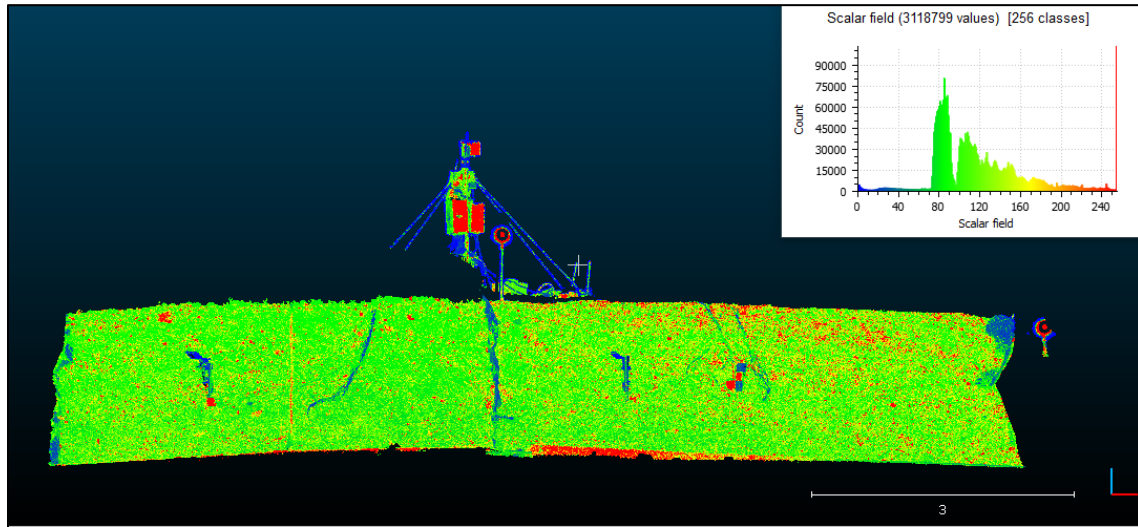
(a)



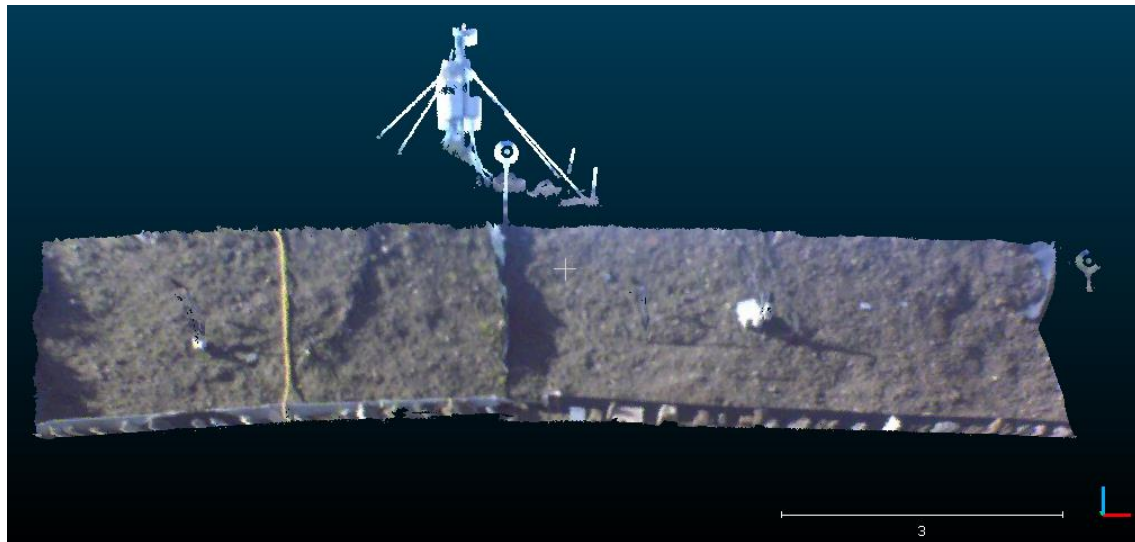
(b)

Figura 10. Tratamiento de nubes de puntos. a) Nube de puntos completa de la captura de datos. b) el área de estudio delimitada.

Las imágenes lidar tienen dos opciones de visualización, una con el valor de la intensidad con la que el rayo láser rebota, la cual depende del tipo de material con que entra en contacto, su textura, humedad, temperatura, entre otros (Figura 11 a). La otra visualización son los colores reales de objeto, como se observa en la (Figura 11 b).



(a)



(b)

Figura 11. Modelo 3D del talud norte en la campaña del 12 de abril del 2018. (a) Visualización con escala de colores por intensidad de rebote del láser. (b) Visualización con colores reales.

Para proceder a la comparación de dos nubes de puntos, previamente se debe realizar una cuidadosa alineación entre estas. Inicialmente se alinea de manera manual utilizando los puntos de control como referencia, se debe indicar cual es la nube de puntos de referencia y cuál es la que se alinea a esta (Figura 12). Posteriormente, de manera automática se realiza un solapamiento de nubes de mínimo 40 %, para asegurar un acercamiento efectivo, aunque cada nube de puntos no es exactamente igual. La clave de una comparación correcta entre de las nubes de puntos es la óptima alineación entre ellas.

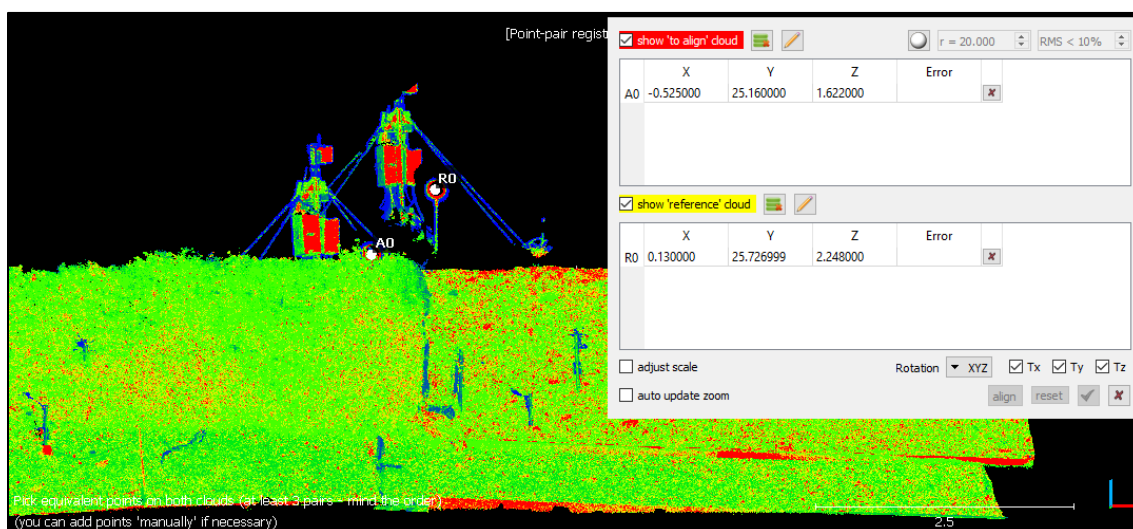


Figura 12. Ejemplo de alineación de dos nubes de puntos.

Una vez que las dos nubes de puntos estén alineadas se utiliza el algoritmo M3C2 para obtener las diferencias significativas entre las nubes de puntos de cada modelo. Este utiliza los parámetros de escala de la normal, de la circunferencia y de la submuestra. Como resultado se obtiene el M3C2 *distance* que indica la distancia entre puntos de las dos nubes. Las distancias esperadas son milimétricas entre el cambio de posición de cada nube, por lo tanto, se utiliza un rango de -0,02 m a 0,02 m.

Una vez calculadas las distancias entre cada nube es posible cuantificar milimétricamente los cambios realizados en cada zona del talud, si es negativo ha retrocedido o desgastado el material y si es positivo se ha acumulado.

Posteriormente, para el cálculo de volumen en m^3 se utiliza la herramienta *Compute 2.5D volumen*, el resultado indica el cambio de volumen ocurrido en la nube de puntos de un periodo a otro. Para calcular el volumen, CloudCompare suma la contribución de cada celda. Esta contribución es el volumen de la huella de la celda multiplicado por la diferencia en altura. Solo las celdas que tienen un valor de altura válido se utilizan para la estimación del volumen global.

Cuando se genera la cuadrícula, se obtiene un informe en la parte inferior, este indica el volumen total, la superficie base y otras estadísticas sobre la cobertura relativa de ambas nubes.

3.4 Modelo de erosión

El modelo de erosión RUSLE, modificado para obras lineales, se desarrolla como el producto de los 4 factores diferentes y se calculan de la siguiente manera:

$$A = R * K * LS * VM \quad Ec. 8$$

Siendo:

A: pérdida de suelo por unidad de superficie (t/ha. año).

R: erosividad de la pluvial (MJ.cm/ha.h. año).

K: parámetro de erosionabilidad del suelo o erodabilidad (t. h/MJ.cm).

LS: parámetro de geometría del talud (adimensional).

VM: parámetro de control de la erosión (adimensional).

A continuación, se explica el desarrollo de cada factor:

Factor R: indica la erosividad de la lluvia y depende de la energía cinética y la intensidad máxima de precipitación durante 30 minutos consecutivos. Se estima para cada uno de los eventos de lluvia significativos y se presenta como valores acumulados. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^j (EI_{30})_i \quad \text{Ec. 9}$$

Donde **E** la energía cinética total de la tormenta, **I₃₀** la intensidad de lluvia en un intervalo de treinta minutos y j es el número de tormentas en el periodo **N**.

Factor K: es el factor de erodabilidad y representa la capacidad del suelo para resistir el poder erosivo de la lluvia.

Se calcula mediante la ecuación:

$$100 * K = 10^{-4} * 2,71M^{1,14} * (12 - a) + 4,20 * (b - 2) + 3,23 * (c - 3) \quad \text{Ec. 10}$$

en donde:

M = (% limo + arena muy fina) (100-% arcilla)

a = porcentaje de materia orgánica

b= parámetro de estructura del suelo

c= parámetro de permeabilidad del suelo

Factor LS: es el parámetro de geometría que representa las diferentes combinaciones de longitud potencial de reguero (distancia entre el origen del flujo superficial y el lugar donde se produce el depósito) y la pendiente de un talud (Hernando y Romano, 2010). Se calcula de la siguiente manera:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,1} \right)^m (65,41 \operatorname{sen}^2(\theta) + 4,56 \operatorname{sen}(\theta) + 0,065) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde,

λ : longitud potencial de reguero.

Θ : ángulo del talud (°).

M: factor que depende de la pendiente ($m=0,5$ para $s > 5\%$).

Factor VM: el parámetro de control de la erosión es el factor con mayor influencia en la pérdida de suelo. Navarro (2002), indica que los valores para este factor VM se da a partir de las técnicas, aplicaciones y productos propios de los terrenos constructivos: emulsiones asfálticas, estabilizadores, selladores de suelos y geotextiles. Se toman los valores

de VM para el talud no vegetado como una condición del terreno de suelo sin cobertura de 0,15 y para el talud vegetado un valor de 0,09.

De acuerdo con Hernando y Romano (2010), el orden de los factores de mayor influyente a menor es: parámetro de control de erosión (VM), parámetro de erosionabilidad del suelo (K), índice de erosión pluvial (R) y finalmente el parámetro de geometría del talud (LS). Para España los rangos de variación más frecuentes en taludes de obras lineales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Rango de variación de cada parámetro. (Hernando y Romano, 2010).

Parámetro		Rango de variación	Unidades
Erosividad pluvial	30-550	R	(hJ.cm/(m ² .h.año))
Erosionabilidad del suelo	0,02-1	K	(t.m ² .h / (ha.hJ.cm))
Geometría del talud	5-40	LS	(-)
Control de erosión	0,01-1	VM	(-)

4. RESULTADOS

4.1 Auscultación

4.1.1 Caracterización del material

El sedimento recolectado es llevado al laboratorio, para obtener su humedad natural y su granulometría (anexo 1 y anexo 2), según el tamaño de sus partículas entre bloques, bolos, gravas, arenas, limos o arcillas, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Clasificación básica de los suelos según el tamaño de partícula.

Tipo de partícula	Tamaño
Bloques	>30 cm
Bolos	15 a 30 cm
Gravas	0,2 a 15 cm
Arenas	0,06 a 2 mm
Limos	2 a 60 μm
Arcillas	< 2 μm

De acuerdo con Cervillos (2017), el suelo utilizado en la construcción del terraplén es un suelo grueso con más del 50 % de las partículas con un diámetro superior a 0,075 mm. En su mayoría se encuentran los tamaños entre 0,15 y 0,60 mm, típico de arenas finas. Y en el orden del 40% de finos.

En la Tabla 5 y la Figura 13, se muestra la distribución del tamaño de partículas del material erosionado de los últimos periodos de estudio. En general, el material erosionado se caracteriza en su mayoría por arenas finas con tamaños de 0,15 y 0,60 mm. El aumento del porcentaje de material grueso en gravas es consecuencia de la erosión de finos a lo largo de

los periodos anteriores, por lo tanto, el material más grueso sea más susceptible a la erosión de la lluvia, ya que se encuentran más expuestos.

Tabla 5. Resumen tamaño de partículas de material erosionado por periodos.

Fecha Inicio	Fecha Final	Talud	Tamaño de grano		
			% grava	% arena	% finos
30/10/2018	10/12/2018	S n.V	15,5	69,2	15,3
30/10/2018	10/12/2018	S. V	8,6	77,1	14,3
10/12/2018	8/3/2019	S n.V	11,1	74,6	14,3
10/12/2018	8/3/2019	S. V	0,5	88,1	11,4
10/12/2018	8/3/2019	N n.V	17,7	76,6	5,7

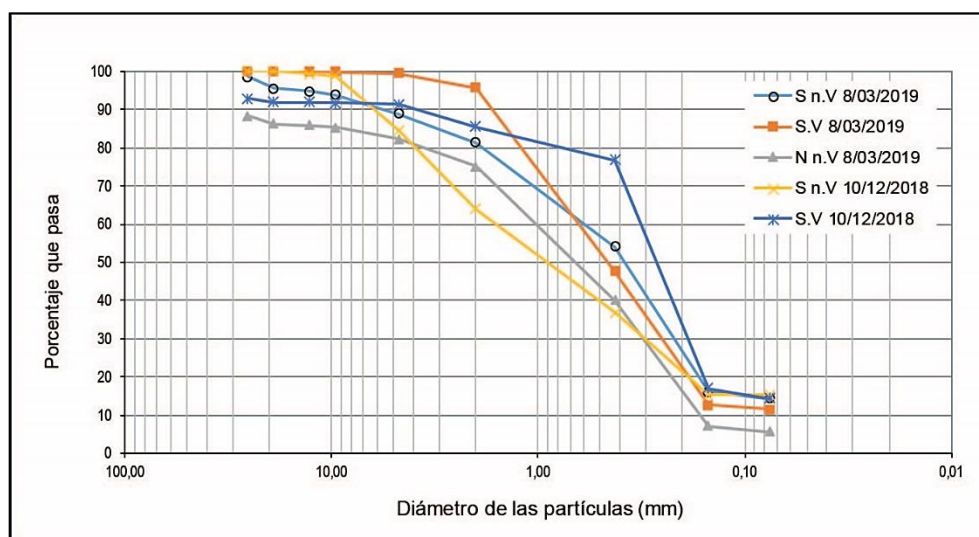


Figura 13. Curva granulométrica del material erosionado.

4.1.2 Cuantificación de la erosión del suelo

El análisis de datos se divide en cuatro periodos, cada uno con una campaña de recolección de sedimentos, para un total de 351 días de monitoreo de la erosión que comprenden las fechas desde el 22 de marzo del 2018 hasta el 8 de marzo del 2019. Las siglas

ND significa No Datos, implican que para este periodo de tiempo no se recolectaron datos de campo.

En la Tabla 6 se observa la cantidad de sedimentos recolectados en cada campaña. Los pesos máximos se encontraron en las pendientes norte vegetado (N.V) y el sur no vegetado (S n.V) durante el periodo 2, esto sucede debido a que el periodo de exposición ha sido en total de 223 días seguidos, ya que anteriores no se recolectó el material. Sin embargo, en el talud N.V, no mostró más material erosionado posteriormente. La menor cantidad de material recolectado en todo el periodo de estudio fue en el talud sur vegetado (S.V). (Figura 14).

Tabla 6. Datos de sedimentos recolectados.

Periodo	Fecha inicio	Fecha final	Duración en días	Peso seco (kg)			
				N n.V	N.V	S n.V	S.V
1	22/03/2018	15/10/2018	207	31,17	ND	ND	ND
2	15/10/2018	30/10/2018	15	2,98	72,81	52,33	ND
3	30/10/2018	10/12/2018	41	24,16	0	29,17	27,8
4	10/12/2018	8/03/2019	88	3,13	0	1,97	1,0
Total				61,44	72,1	83,47	28,8

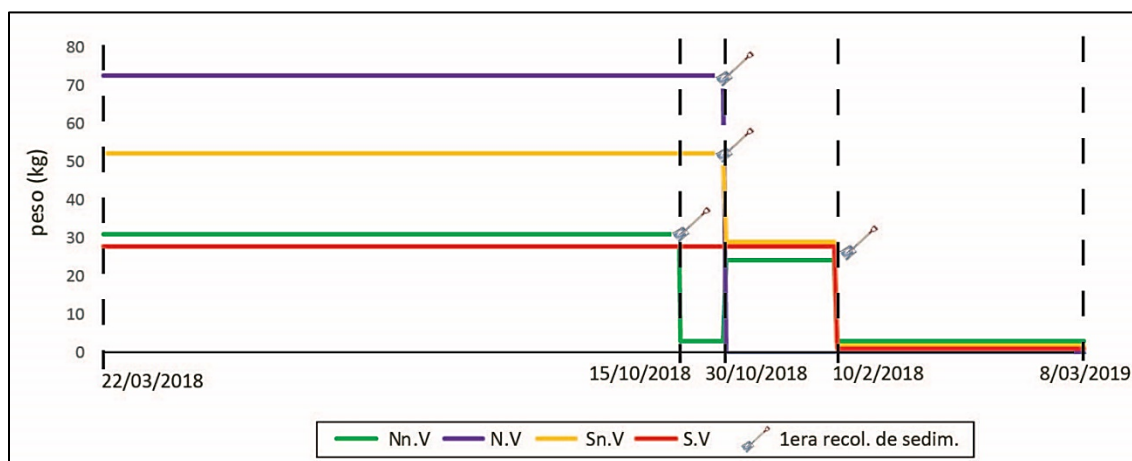


Figura 14. Cantidad de sedimentos recolectados en cada talud del terraplén por periodos. La simbología indica la primera recolección de material posterior a la instalación de la canaleta.

En la Tabla 7, se presentan los volúmenes de material erosionado para cada talud, utilizando una densidad aparente de $1,7 \text{ g/cm}^3$ para los taludes del lado sur y $1,9 \text{ g/cm}^3$ para los taludes del lado norte. Como se ha mencionado anteriormente, el talud que presenta mayor material erosionado S n.V con $0,051 \text{ m}^3$ y el de menor cantidad es el N.V con $0,005 \text{ m}^3$.

Tabla 7. Volumen de material erosionado.

Periodo	Fecha inicio	Fecha final	Duración	Volumen (m^3)			
				N n.V	N.V	S n.V	S.V
1	22/3/2018	15/10/2018	207	0,016	ND	ND	ND
2	15/10/2018	30/10/2018	15	0,002	0,005	0,034	ND
3	30/10/2018	10/12/2018	41	0,015	0	0,016	0,016
4	10/12/2018	8/3/2019	88	0,002	0	0,001	0,001
Total				0,035	0,005	0,051	0,017

En la Tabla 8 y Figura 15 se observa la tasa de pérdida de suelo ocurrida en cada periodo en función de los gramos por día, para cada talud. En los primeros 3 periodos el talud S n.V presenta siempre la mayor cantidad de material erosionado, seguido por el N n.V, que

va en aumento en el periodo 4. En los taludes vegetados, el lado sur presenta mayor cantidad de suelo removido que el lado norte.

Tabla 8. Datos del material erosionado por día.

Periodo	Fecha inicio	Fecha final	Duración	Lluvia total (mm)	Tasa erosión (g/día)			
					N n.V	N.V	S n.V	S.V
1	22/03/2018	15/10/2018	207	366,4	150,60	ND	ND	ND
2	15/10/2018	30/10/2018	15	72	198,93	32,80	235,73	ND
3	30/10/2018	10/12/2018	41	75,8	589,27	0	711,49	105,83
4	10/12/2018	8/03/2019	88	8,2	35,58	0	22,44	11,92

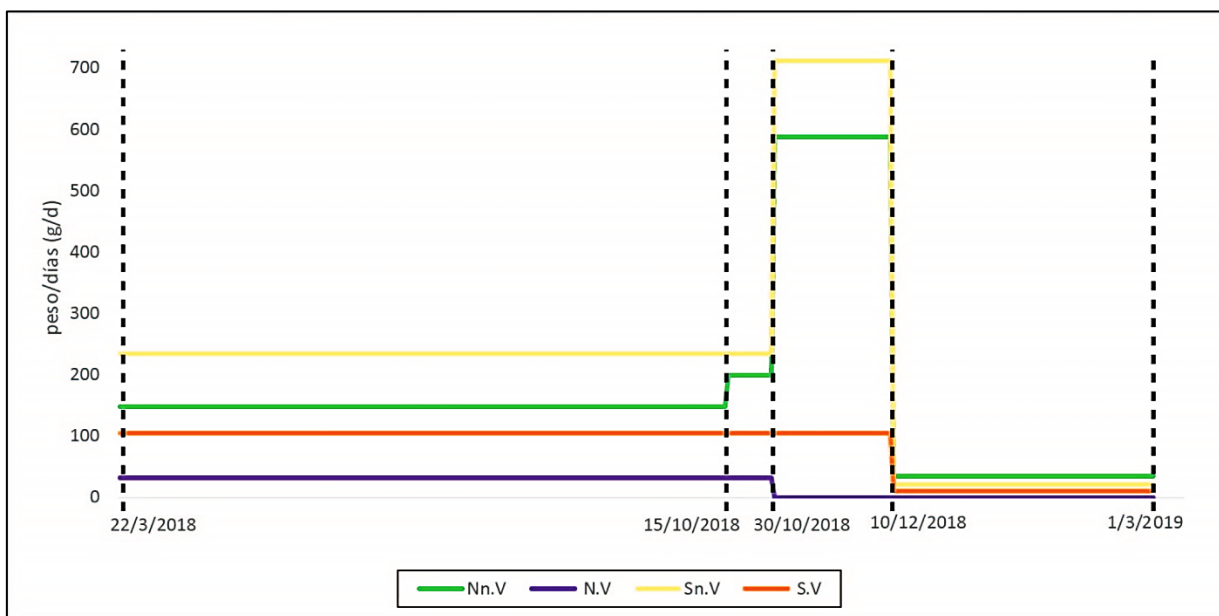


Figura 15. Gráfica de tasa de pérdida de suelo ocurrida en cada periodo.

El índice de área foliar (IAF) es la expresión numérica adimensional, que resulta de la división aritmética del área de las hojas de un cultivo (m^2) y el área de suelo en donde está establecido (m^2).

En la Figura 16, se observa la comparación de la variación del IAF con la erosión ocurrida en los taludes vegetados, en el cual en el periodo 1 y 2 aún estaba en proceso de desarrollo la vegetación por lo tanto la erosión se pudo haber provocado cuando el IAF era aún mínimo. En el caso del talud sur el IAF ha tenido un crecimiento menor, el cual se ve reflejado en que la cantidad de material erosionado sea mayor. En el periodo 3, el IAF llegó a su punto máximo y se mantuvo estable, para los dos taludes, por esta razón la acumulación de sedimentos erosionado disminuyó hasta detenerse.

En general, la disminución del material erosionado conforme aumenta el IAF, indica el efecto de la vegetación en el proceso erosivo, donde se disminuye la erosión considerablemente, lo que confirma la hipótesis que entre mayor vegetación menos pérdida de suelo. De acuerdo con Regues y Torri (2002), las gotas de lluvia al entrar en contacto con la vegetación y las hojas, se altera la distribución de tamaños y reducen su velocidad, lo que disipa su energía de impacto, por tanto, disminuye la separación de las partículas del suelo.

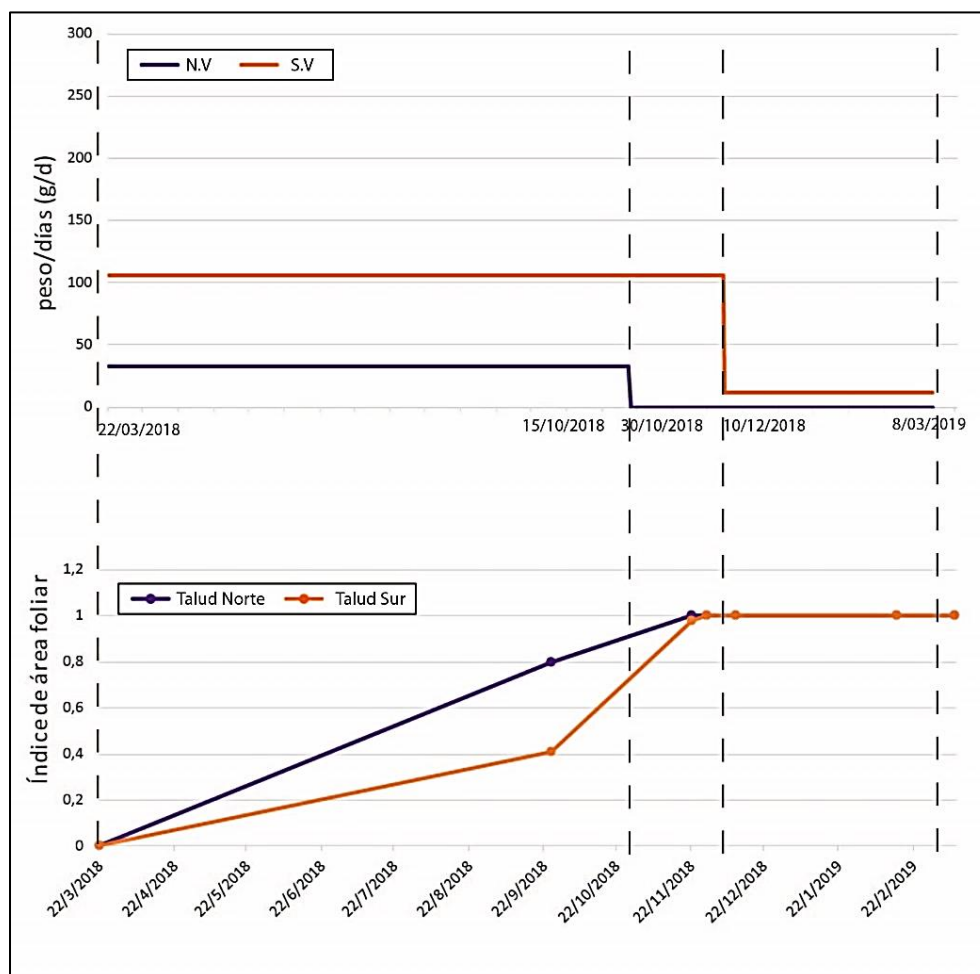


Figura 16. Índice de área foliar en comparación con la pérdida de suelo de lado vegetado del talud.

4.2 Análisis de precipitaciones

Para el análisis del efecto de la lluvia en la erosión del terraplén, se identificaron un total de 56 eventos de lluvia a lo largo de un periodo de un año, en la Tabla 9 se observan la cantidad de eventos por mes y cuántos de ellos superaron o no los de 4 mm de lluvia. Los primeros se consideran eventos de lluvia con efecto erosivo. Se observa que el mes con mayor

cantidad de eventos de los dos tipos es el mes de octubre, el de menor cantidad de eventos de lluvia son los meses de febrero y marzo del 2019, seguidos por diciembre, junio y agosto del 2018.

Tabla 9. Eventos de lluvia por mes en un lapso de un año.

Mes	Año	# eventos > 4 mm	# eventos < 4 mm
marzo	2018	1	3
abril	2018	4	1
mayo	2018	2	1
junio	2018	2	1
julio	2018	1	0
agosto	2018	1	0
setiembre	2018	3	3
octubre	2018	10	12
noviembre	2018	2	6
diciembre	2018	0	0
enero	2019	2	0
febrero	2019	0	0
marzo	2019	0	0
Total		28	27

Una vez identificados los 28 eventos con precipitaciones mayores a 4 mm de lluvia total, se determina la duración de cada evento (h), el valor de la intensidad máxima de intervalos de 30 minutos (mm/h), la energía cinética (MJ/ha), como se observa en la Figura 17 y la Tabla 10, dividido en los cuatro periodo de estudio (Anexo 3).

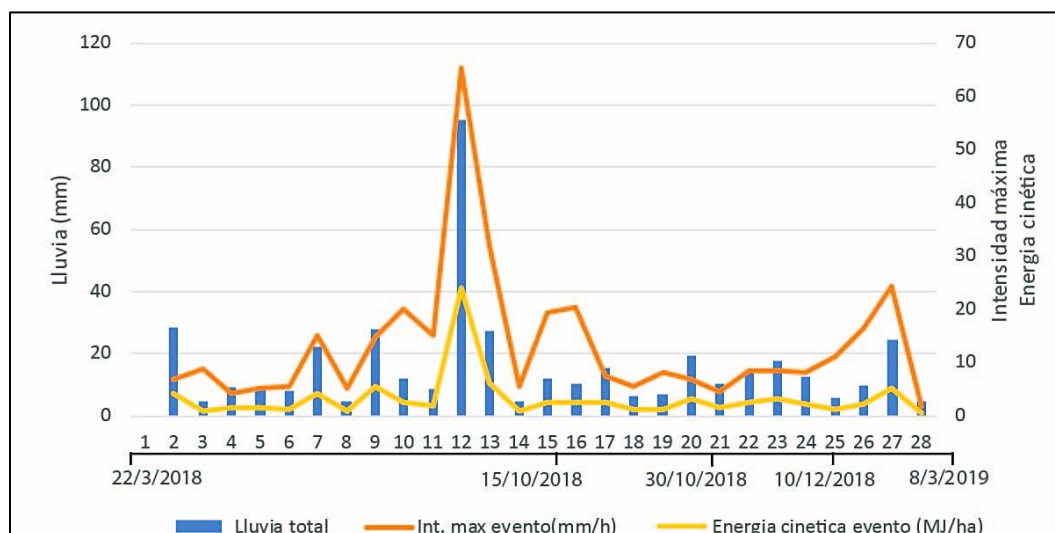


Figura 17. Gráfico resumen de la lluvia total, intensidad máxima de intervalos de 30 minutos y energía cinética, para cada evento.

El periodo 1, con un total de 16 eventos de lluvia, se muestra que los mayores valores de intensidad máxima ocurren a partir de agosto. En el caso del periodo 2 presenta 6 eventos de lluvia con intensidades máximas entre 5,6 y 8,4 mm/h, pero tiene menor material erosionado con respecto al periodo 3, el cual, a pesar de tener solo 4 eventos de lluvia, estos tienen mayores intensidades máximas con valores entre 8 y 24,4 mm/h, lo que implica en un mayor índice de erosión y por esta razón presenta mayor tasa de pérdida de suelo.

Tabla 10. Datos obtenidos de cada evento de lluvia considerado erosivo.

Mes	Año	Periodo	# evento	Lluvia total (mm)	Duración (h)	Int. max (mm/h)	Energía cinética evento (MJ/ha)	Índice de erosión (MJ mm/ha.h)
marzo	2018	1	1	28,6	20,9	6,8	4,0	27,4
abril	2018		2	4,6	1,0	8,8	0,9	7,9
abril	2018		3	9,2	5,7	4	1,4	5,4
abril	2018		4	9	2,2	5,2	1,6	8,1
abril	2018		5	7,8	4,3	5,6	1,2	6,6
mayo	2018		6	22,2	5,3	15,2	4,2	64
mayo	2018		7	4,4	1,8	5,2	0,7	3,6
junio	2018		8	28	4,3	14,8	5,6	82,3
junio	2018		9	12,2	2,3	20	2,6	52,3
julio	2018		10	8,4	1,0	15,2	1,7	25,9
agosto	2018		11	95,4	6,0	65,2	24,1	1568,7
setiembre	2018		12	27	1,8	32	6,2	198
setiembre	2018		13	4,8	2,2	5,6	0,8	4,3
setiembre	2018		14	11,8	1,4	19,2	2,5	48,2
octubre	2018		15	10,4	0,6	20,4	2,4	48,7
octubre	2018		16	15,4	55,8	7,6	2,6	19,7
octubre	2018	2	17	6,4	1,6	5,6	1,1	6,16
octubre	2018		18	6,6	1,2	8	1,2	9,7
octubre	2018		19	19,4	6,5	6,8	3,2	21,6
octubre	2018		20	10	6,2	4,4	1,4	6,3
octubre	2018		21	14,6	6,5	8,4	2,4	30,35
octubre	2018		22	17,4	6,9	8,4	3,0	25,5
octubre	2018	3	23	12,6	4,4	8	2,1	17,09
octubre	2018		24	5,6	0,5	11,2	1,2	12,9
noviembre	2018		25	9,4	1,0	16,4	2,0	32,9
noviembre	2018		26	24,6	3,4	24,4	5,3	128,9
enero	2019	4	27	4,7	3,0	1,7	0,6	0,99
enero	2019		28	25	14,0	3,45	3,4	11,7

En la Tabla 11, se resume el para cada periodo de estudio, el porcentaje de cantidad de precipitación que representan los eventos de lluvia erosivos. Estos comprenden entre un 77 % y 86 % de la cantidad de lluvia, por lo tanto, se considera información representativa para el análisis de parámetros que caracterizan su erosividad.

Tabla 11. Resumen de la representación de los eventos de lluvia en la precipitación total de cada periodo de estudio.

Periodo	Fecha inicio	Fecha final	Lluvia total (mm)	Lluvia de eventos erosivos
1	22/3/2018	15/10/2018	366,4	77,6 %
2	15/10/2018	30/10/2018	65,8	86,6 %
3	30/10/2018	10/12/2018	82	84,9 %
4	10/12/2018	8/3/2019	38	78,2 %

En la Figura 18, se observa la relación de la cantidad de precipitación por evento y la intensidad máxima en intervalos de 30 minutos. Existe una tendencia de entre mayor cantidad de lluvia, mayor intensidad, sin embargo, hay eventos los cuales presentan una baja intensidad a pesar de su alta precipitación, esto puede indicar que tuvieron una larga duración.

La erosividad de la lluvia depende de su intensidad, por esta razón, en el periodo del 30 de octubre al 10 de diciembre del 2018 aunque este presenta menor precipitación, debido a su alta intensidad este tiene mayor efecto de erosión sobre el terraplén. Por esa implicación los eventos ocurridos a partir del 10 de diciembre del 2018 presentan la menor cantidad de material erosionado como se observa en la Figura 19.

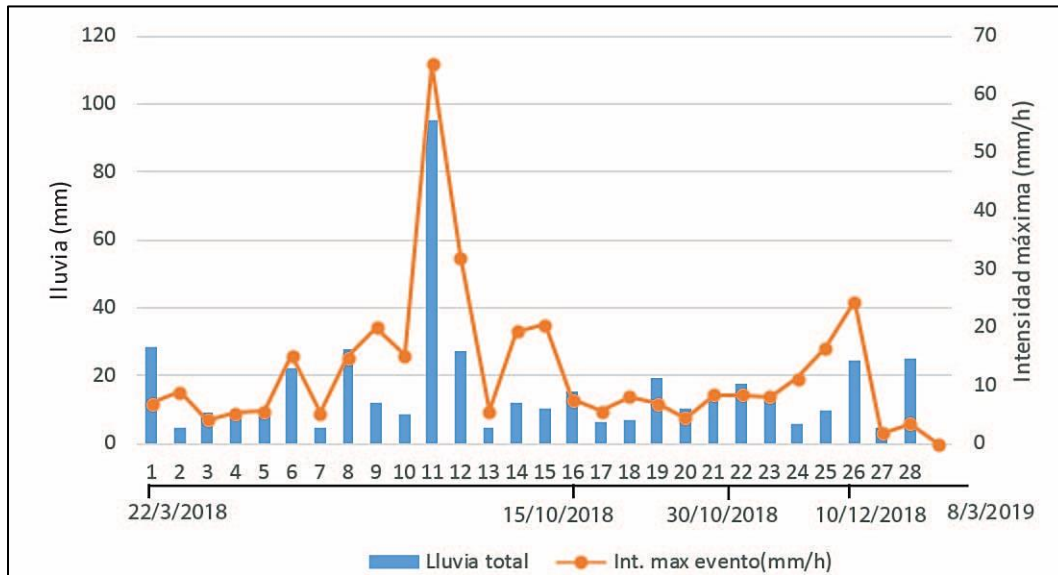


Figura 18. Cantidad de lluvia y su intensidad máxima para cada evento.

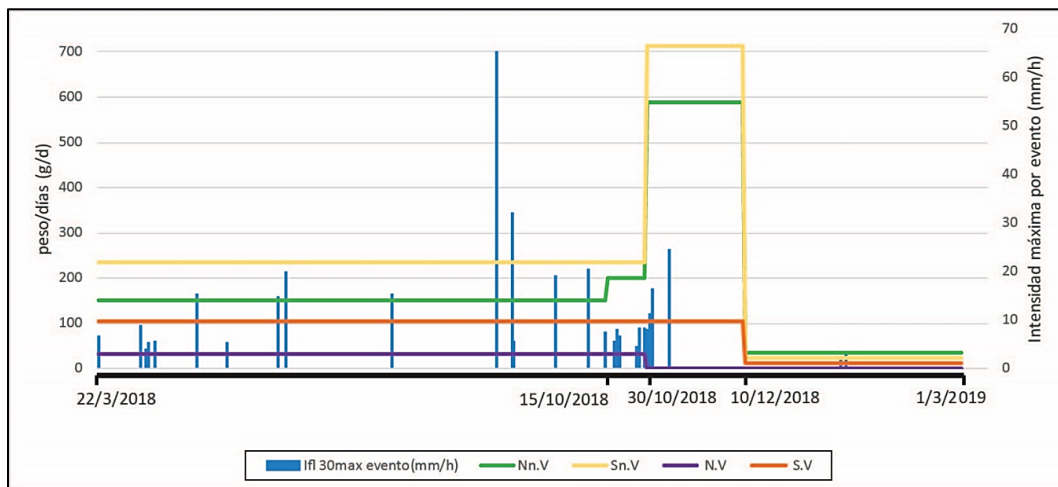


Figura 19. Relación peso erosionado por día con la intensidad de cada evento dentro de cada periodo.

La Figura 20, muestra la relación de la energía cinética de cada evento de lluvia con la cantidad de precipitación y en la Figura 21 su relación con la cantidad de material erosionado por día dentro de cada periodo de tiempo. En el periodo del 30 de octubre al 10

de diciembre del 2018, se observa mayor energía, por lo tanto, repercute en la cantidad de material erosionado.

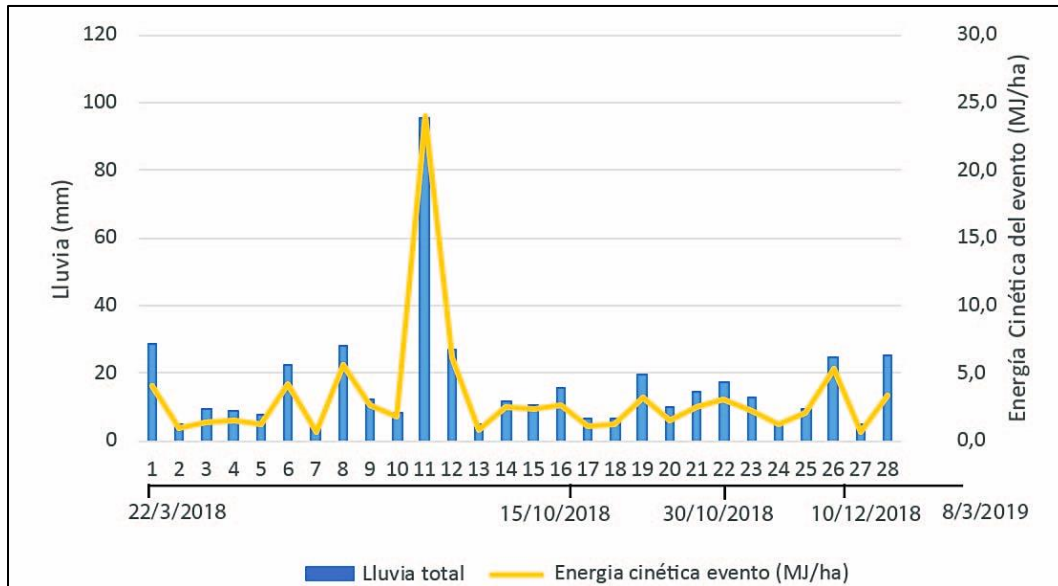


Figura 20. Cantidad de lluvia y su energía cinética para cada evento.

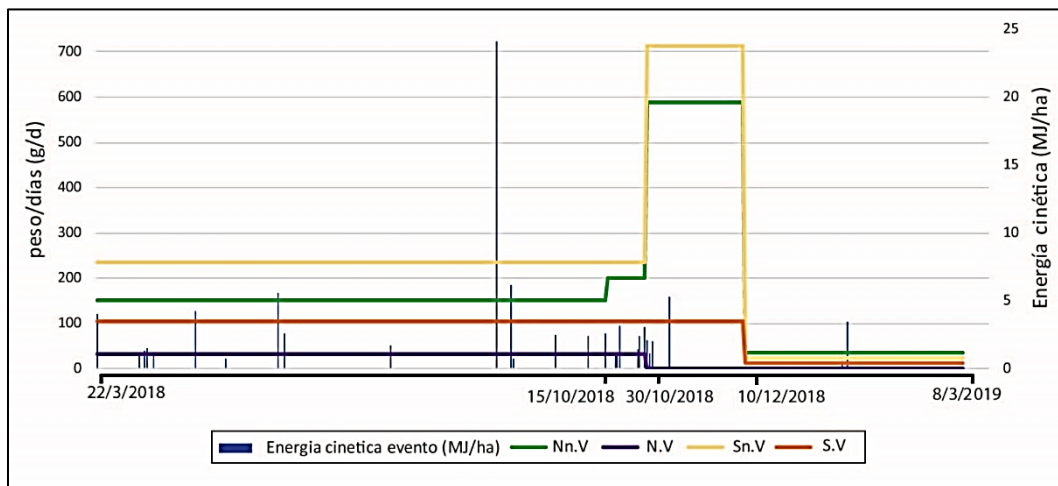


Figura 21. Relación peso erosionado por día con la energía cinética de cada evento dentro de cada periodo.

La Tabla 12 indica los datos máximos de cada parámetro obtenido de las precipitaciones con respecto a la cantidad de material que fue recolectado de la canaleta al

final de cada periodo. En el caso del talud Nn.V se observa la relación directa con la variación de la intensidad y la energía, en el cual entre mayores sean estos parámetros, aumenta la cantidad de material erosionado. Para los taludes N.V y Sn.V el material erosionado ha sido expuesto en todo el periodo 1 y 2, de acuerdo al comportamiento de las lluvias, se puede asumir que la mayor cantidad de sedimento ha sido erosionado en el primer periodo, ya que en los siguientes esta acumulación de material se ajusta a los valores de los parámetros de erosividad, lo mismo ocurre en el talud S.V donde el valor de los sedimentos erosionados resultan de la exposición de los periodos 1, 2 y 3.

Tabla 12. Resumen de intensidades máximas, energía máxima y cantidad de material erosionad en cada periodo de estudio.

Periodo	Fecha inicio	Fecha final	Int. máx. (mm/h)	E. cinética máx. (MJ/ha)	índice de erosión máx (MJ.mm/ha.h)	Peso kg			
						Nn.V	N.V	Sn.V	S.V
1	22/3/2018	15/10/2018	65,2	24,1	1568,70	31,2	ND	ND	ND
2	15/10/2018	30/10/2018	8,4	3,2	21,70	3,0	72,8	52,3	ND
3	30/10/2018	10/12/2018	24,4	5,3	128,90	24,2	0,0	29,2	27,8
4	10/12/2018	8/3/2019	3,45	3,4	11,70	3,1	0,0	2,0	1,0

En cada talud con la misma orientación se espera que el lado sin vegetación presente la mayor cantidad de material, sin embargo, como se observa en el talud norte debido al crecimiento de la vegetación en el lado correspondiente, este también ha sido expuesto a cierto tiempo sin vegetación por lo tanto en ese tiempo fue erosionado con mayor facilidad.

En general de los taludes no vegetados, el de orientación sur siempre presenta la mayor cantidad de sedimento erosionado, esto puede ser consecuencia de otros factores

ambientales como la velocidad del viento, el cual según datos de campo en el talud sur este es mayor que en el talud norte (Solá, 2019).

La tasa de erosión total para cada talud en el periodo de un año se presenta en la Figura 22. Los mayores valores de erosión se obtienen de los taludes no vegetados y los menores en los vegetados.

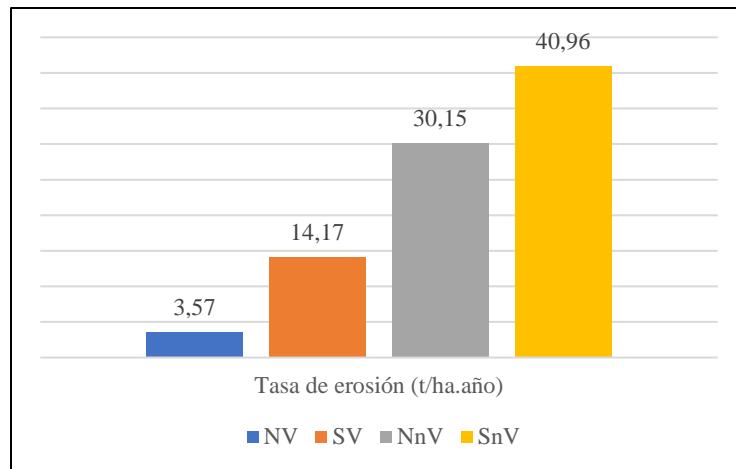


Figura 22. Tasa de erosión para cada talud del terraplén.

4.3 Escáner Lídar Terrestre

Se realizaron cuatro campañas lídar con las fechas del 12 de abril, 30 de octubre, 10 de diciembre del 2018 y el 8 de marzo del 2019, cada una consistió en un escaneo para cada orientación del terraplén. De cada toma se obtiene una imagen conformada por una nube de puntos que genera un modelo 3D del talud. Para los análisis a realizar se consideró únicamente el lado no vegetado de cada orientación (Figura 23).



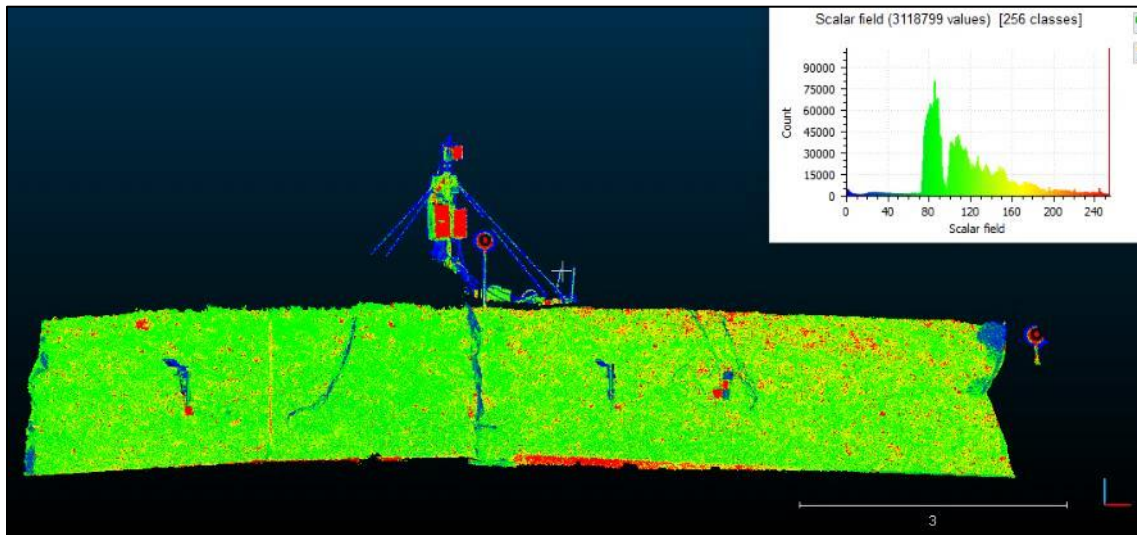
Figura 23. Fotografía y su respectivo modelo 3D.

4.3.1 Análisis y cálculo de diferencias en el talud Norte

En la Figura 24, se observa el modelo 3D del talud realizado el 12 de abril del 2018, este se considera la etapa inicial para las comparaciones entre nubes de puntos, mediante el cálculo de distancias entre ellas. Los tonos azules dentro del talud representan la instrumentación colocada, los verdes el suelo y el rojo refleja posiblemente materiales más claros a blancos.



(a)



(b)

Figura 24. (a) Fotografía del talud norte el 12 de abril del 2018. (b) Modelo 3D.

En la Figura 25, se muestra el modelo 3D de 30 de octubre del 2018, se diferencia el crecimiento de la vegetación del lado izquierdo y cómo esto oculta la instrumentación.

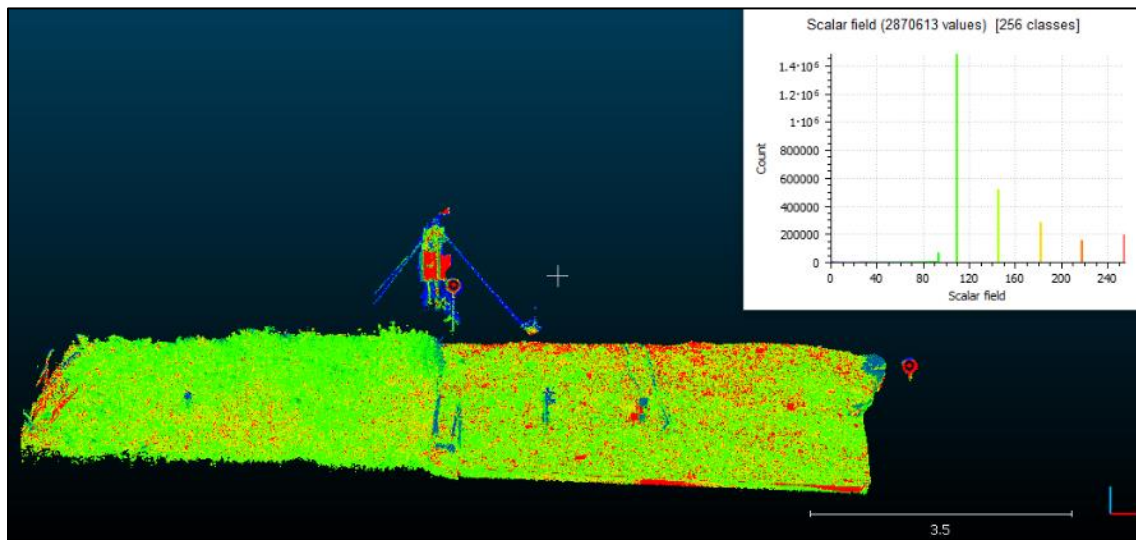
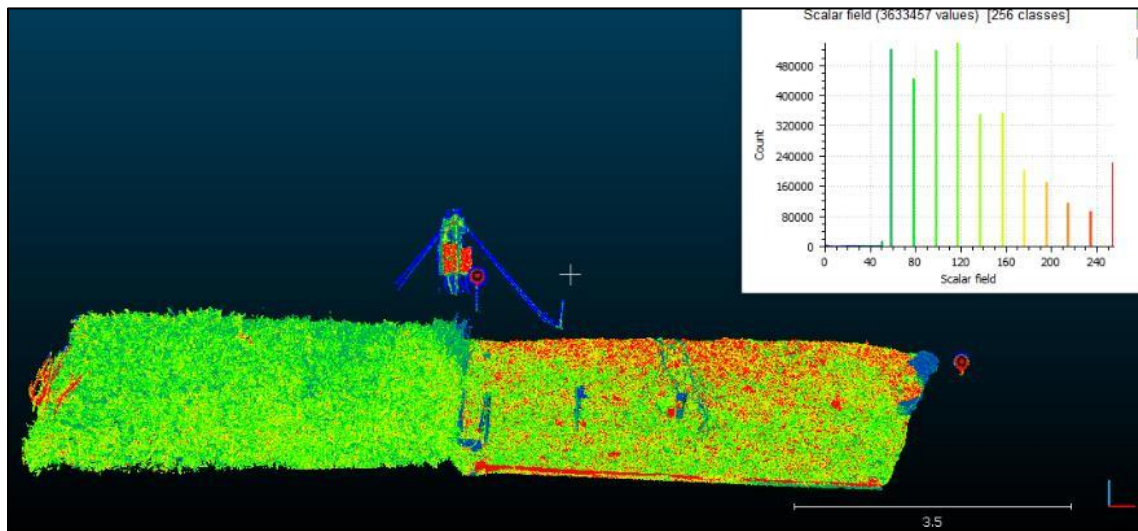


Figura 25. Modelo 3D del talud norte. Fecha del 30 de octubre del 2018

En la Figura 26, se observa el estado del talud y el modelo 3D del 10 de diciembre del 2018, las zonas con tonalidad rojas aumentan en el lado derecho debido a la mayor exposición de escombros.



(a)



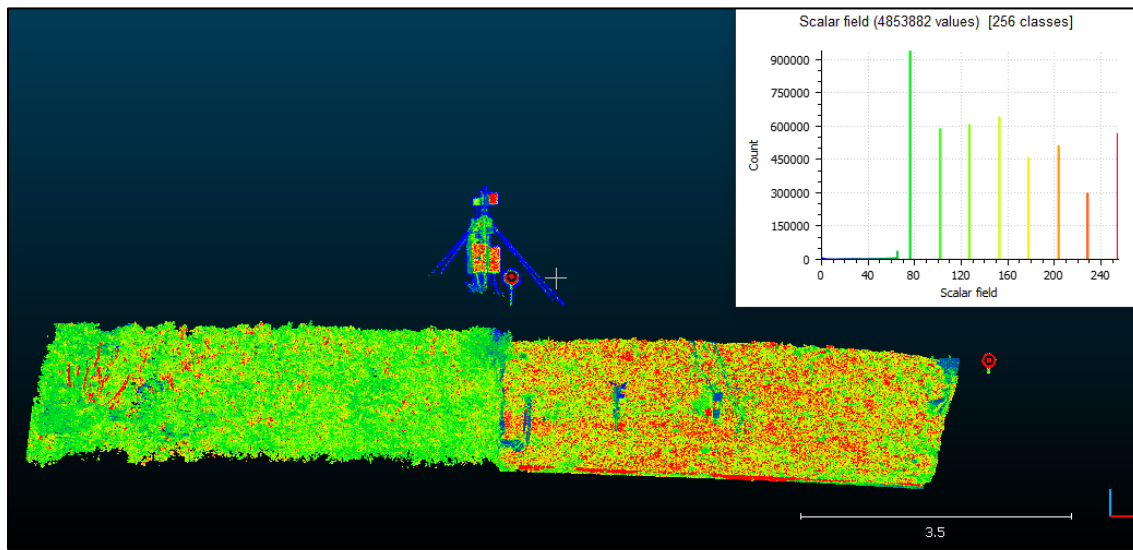
(b)

Figura 26. (a) Fotografía del talud norte el 10 de diciembre 2018. (b) Modelo 3D.

En la Figura 27, se observa el estado del talud el 8 de marzo del 2019, etapa final de los periodos de comparación.



(a)



(b)

Figura 27. (a) Fotografía del talud norte el 8 de marzo del 2019. (b) Modelo 3D.

El cálculo de diferencia de distancias entre dos nubes de puntos consecutivas mediante el algoritmo *M3C2 Distance*, se realizó para cuantificar y mapear los cambios ocurridos, a escala milimétrica, que ocurrieron entre campañas.

La Figura 28, muestra los cambios ocurridos en el primer periodo entre el 12 de abril y el 30 de octubre del 2018. Estas son diferencias entre 5 mm hasta 2 cm en las cuales las tonalidades rojas muestran un cambio en dirección negativa de las partículas de suelo, es decir, desgaste de la superficie y los colores amarillentos representan cambios en dirección positivo, que indican acumulación de material. Al lado de cada escala, un histograma indica la distribución de los cambios ocurridos.

Estas diferencias intercaladas en franjas sugieren en la zona más alta un desgaste que se acumula en la siguiente franja y así sucesivamente, sin embargo, las zonas de desgaste son más anchas que las de acumulación, las tonalidades más claras indican los cambios menores entre 0 a 5 mm. El desgaste de la franja inferior indica que ese material caído ha sido depositado en la canaleta.

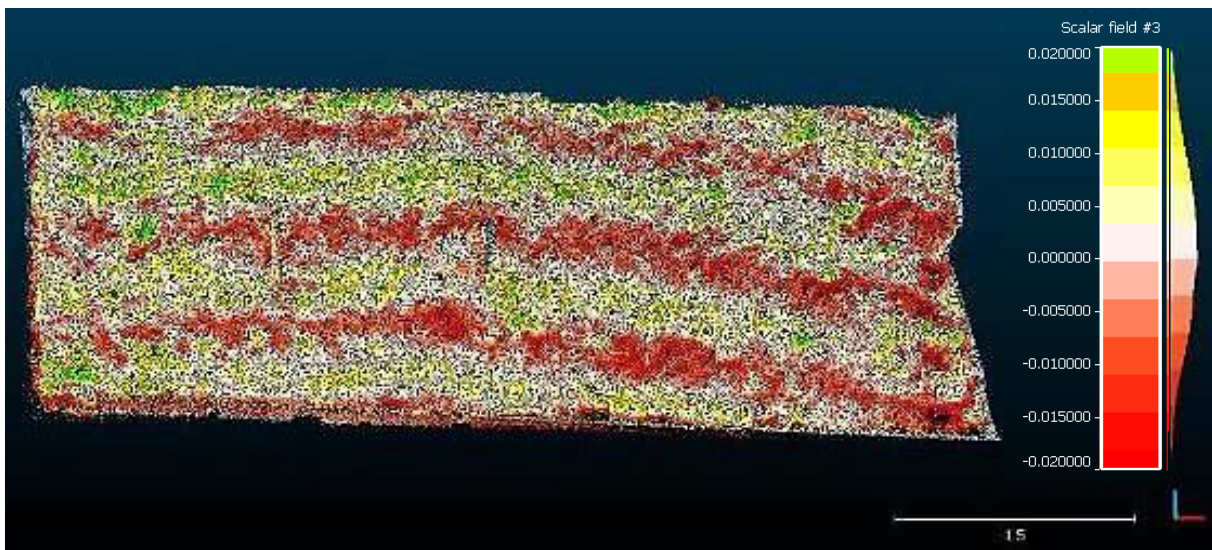


Figura 28. Cambios en un periodo de 207 días entre las fechas 12 de abril y 30 de octubre del 2018.

La Figura 29, en el periodo entre el 30 de octubre y 10 de diciembre del 2018, se observan un ensanchamiento de las zonas de acumulación con hasta 2 cm. Los espacios esporádicos de tonos azules indican la falta de información debido a las sobras que provocan los instrumentos sobre el talud.

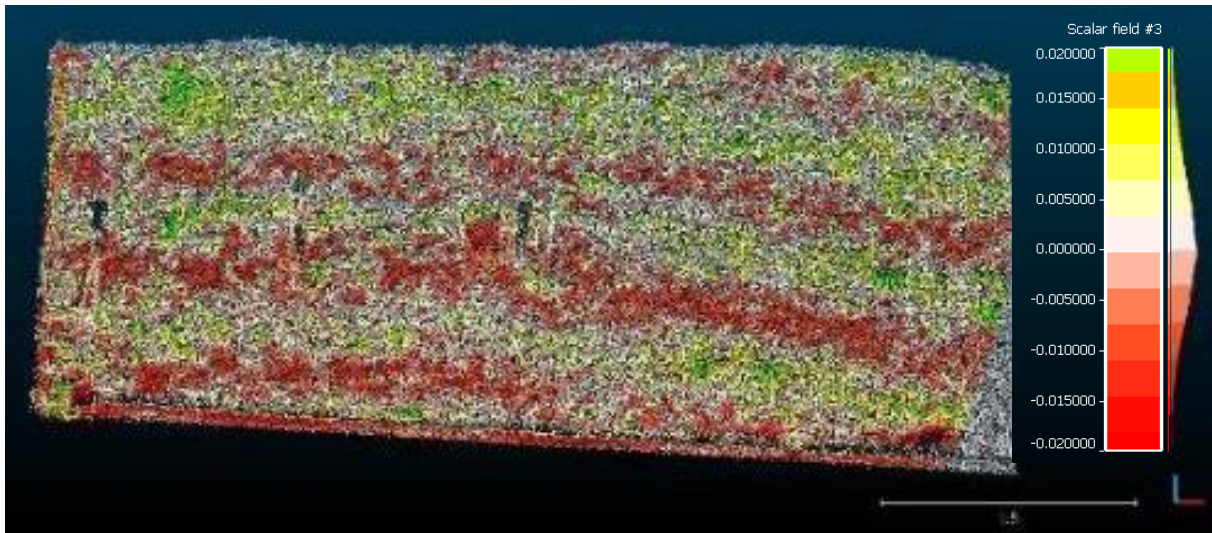


Figura 29. Cambios en un periodo de 41 días entre el 30 de octubre y el 10 de diciembre del 2018.

La última etapa de cambios detectados se observa en la Figura 30, en un periodo del 10 de diciembre del 2018 al 8 de marzo del 2019, los cambios son menores entre 0 a 1 cm, esto indica la poca actividad erosiva en el terraplén, consecuencia de la disminución de precipitaciones en este periodo.

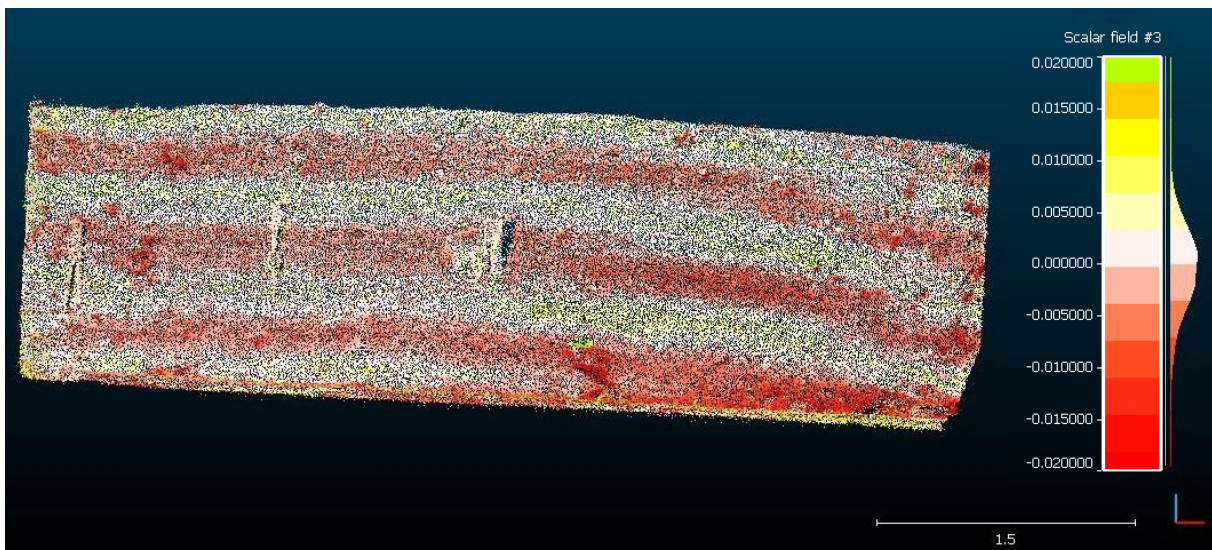


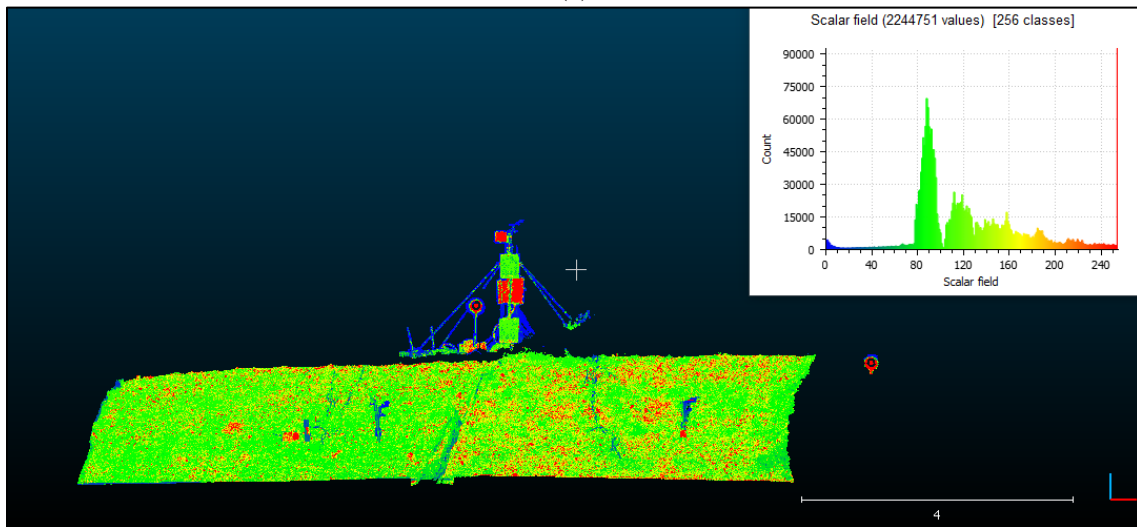
Figura 30. Cambios en un periodo de 88 días entre las fechas del 10 de diciembre del 2018 al 8 de marzo del 2019.

4.3.2 Análisis y cálculo de diferencias en el talud Sur

El talud con orientación sur se muestra en su condición inicial el 12 de abril del 2018, se muestra en la Figura 31.



(a)



(b)

Figura 31. (a) Fotografía del talud sur el 12 de abril del 2018. (b) Modelo 3D.

En la Figura 32, se observa la nube de punto capturada el 30 de octubre del 2018, utilizando los colores de la intensidad de rebote de la luz laser y los colores reales del talud.

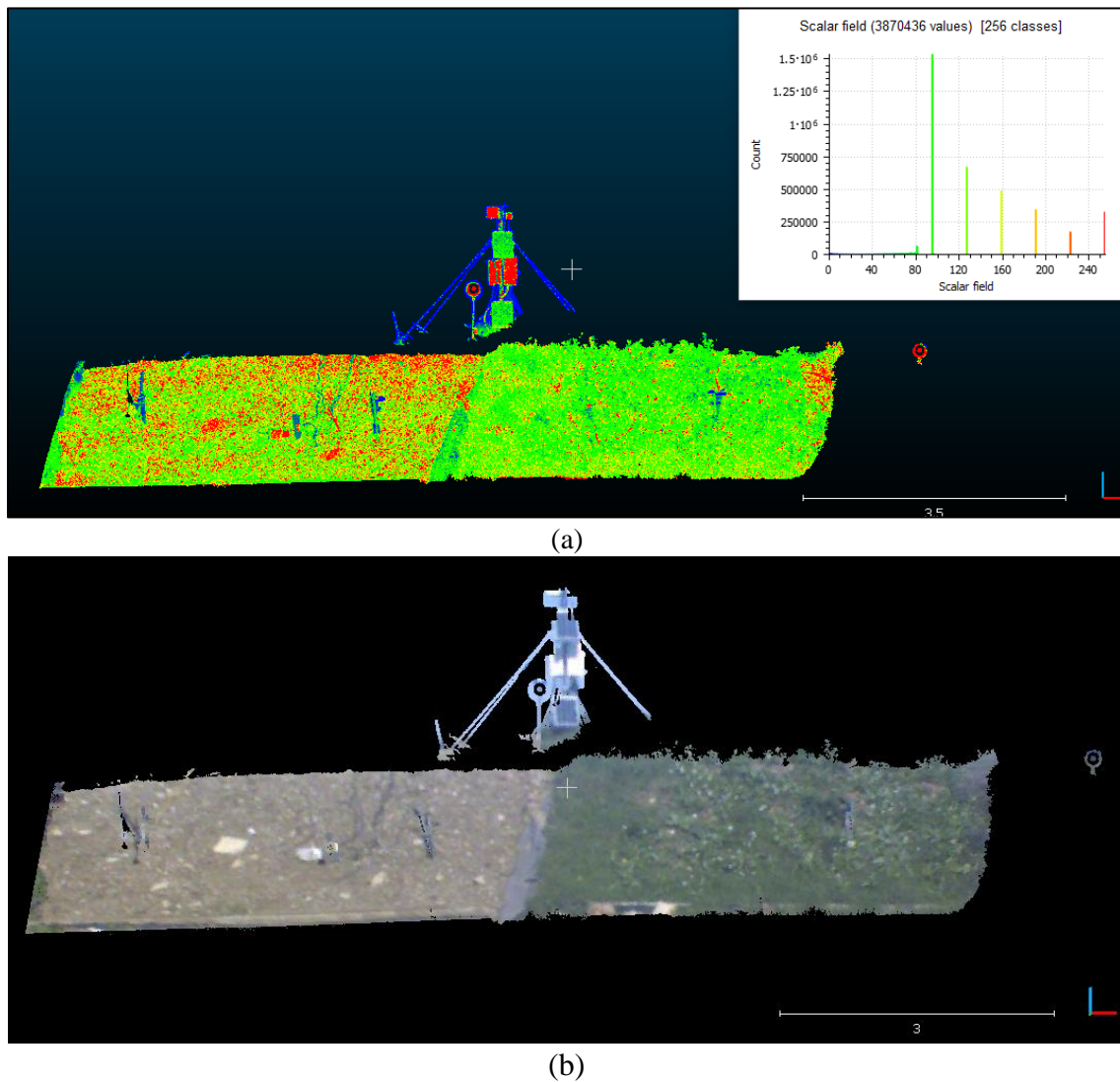
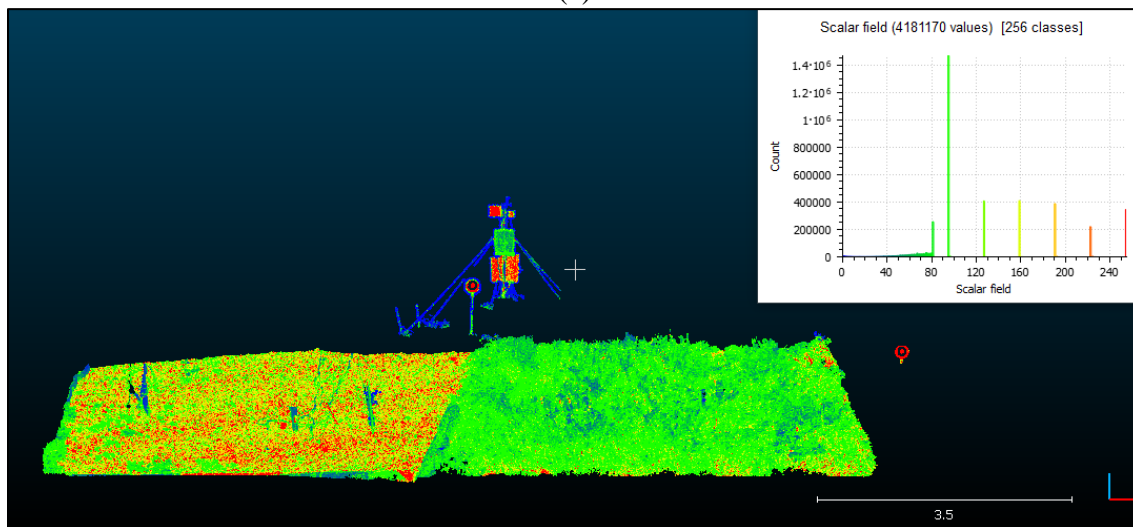


Figura 32. Modelo 3D del talud sur, el 30 de octubre del 2018. (a) Visualización con intensidad de rebote del láser. (b) Visualización con colores reales.

La fotografía y el modelo 3D del talud el 10 de diciembre del 2018 se muestran en la Figura 33, y en la Figura 34 se muestra la fotografía y el modelo 3D de la última etapa de estudio el 8 de marzo del 2019.



(a)

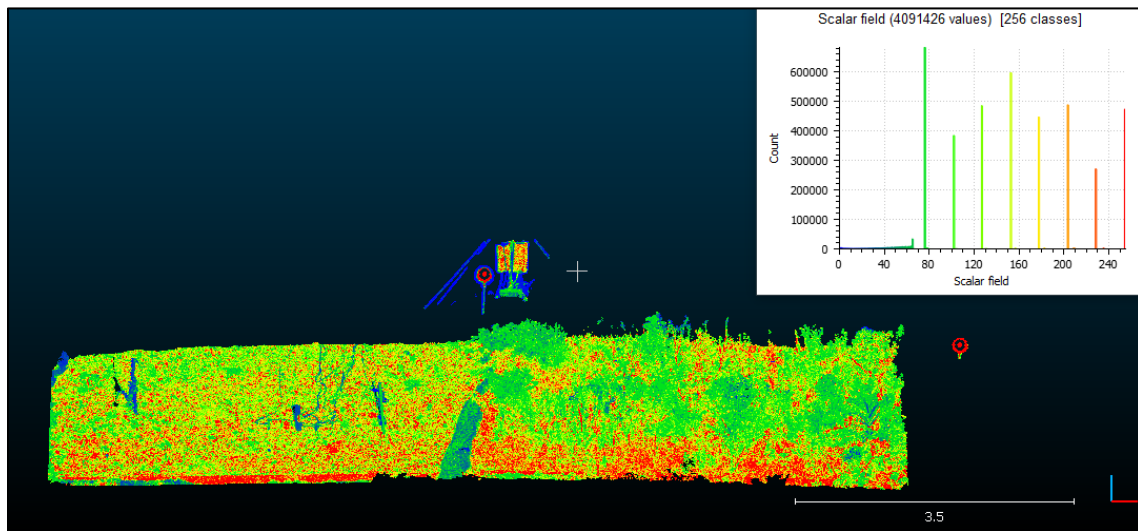


(b)

Figura 33. (a) Fotografía del talud norte el 10 de diciembre del 2018. (b) Modelo 3D.



(a)



(b)

Figura 34. (a) Fotografía del talud norte el 8 de marzo del 2019. (b) Modelo 3D.

En la Figura 35, el cálculo de diferencia de distancias en el talud sur entre el 22 de abril y el 30 de octubre del 2018 muestran el desgaste y acumulación de sedimentos de manera esporádica, sin embargo, un claro desgaste de la zona inferior del talud con cambios de hasta 2 cm .

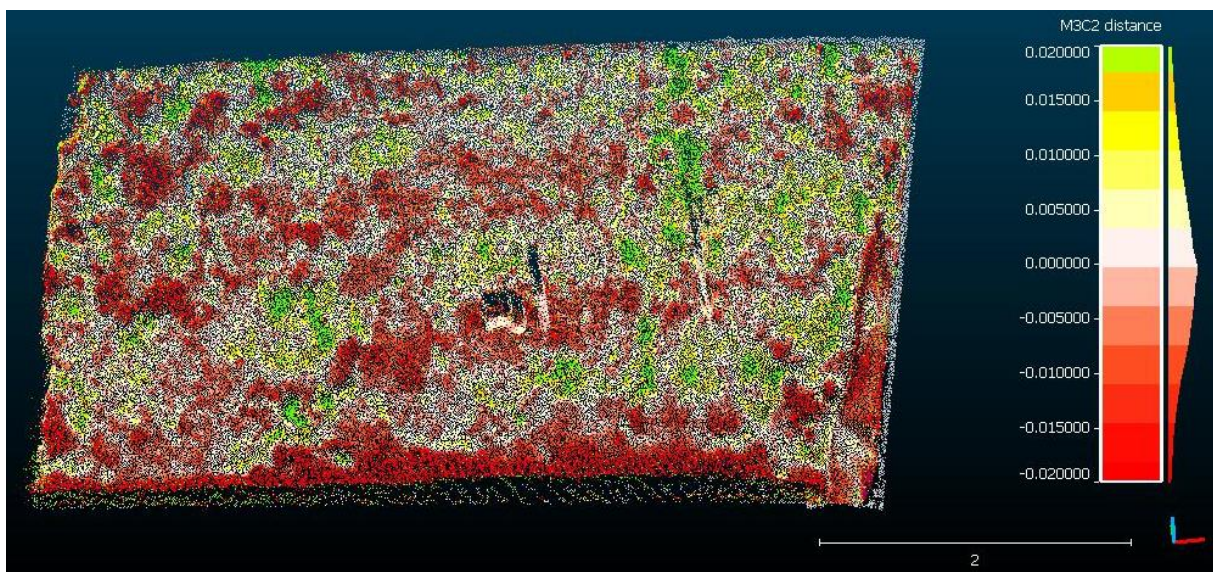


Figura 35. Cambios en un periodo de 207 días entre las fechas 12 de abril y 30 de octubre del 2018.

La Figura 36 muestra, las diferencias entre el 30 de octubre y el 10 de diciembre del 2018, en general muestra cambios en su mayoría de 0,5 a 1 cm. En la zona inferior derecha los cambios son más leves comparado con la zona izquierda en la cual se aprecias con mayor claridad las bandas de erosión.

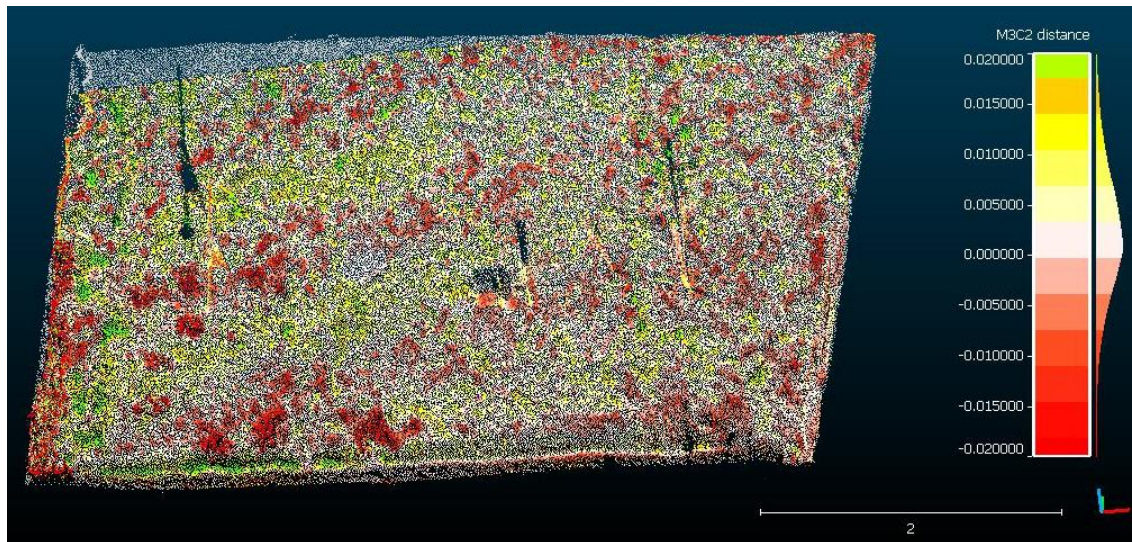


Figura 36. Cambios en un periodo de 41 días entre el 30 de octubre y el 10 de diciembre del 2018.

En la Figura 37, se observan las diferencias en la última etapa de estudio entre el 10 de diciembre del 2018 al 8 de marzo de 2019. Al ser periodo con menor cantidad de precipitaciones, en general, presenta cambios menores entre 0 y 5 mm. El lado izquierdo muestra zonas cambios de hasta 2 cm de desgaste, posiblemente causado por la eliminación de vegetación previo al escaneo.

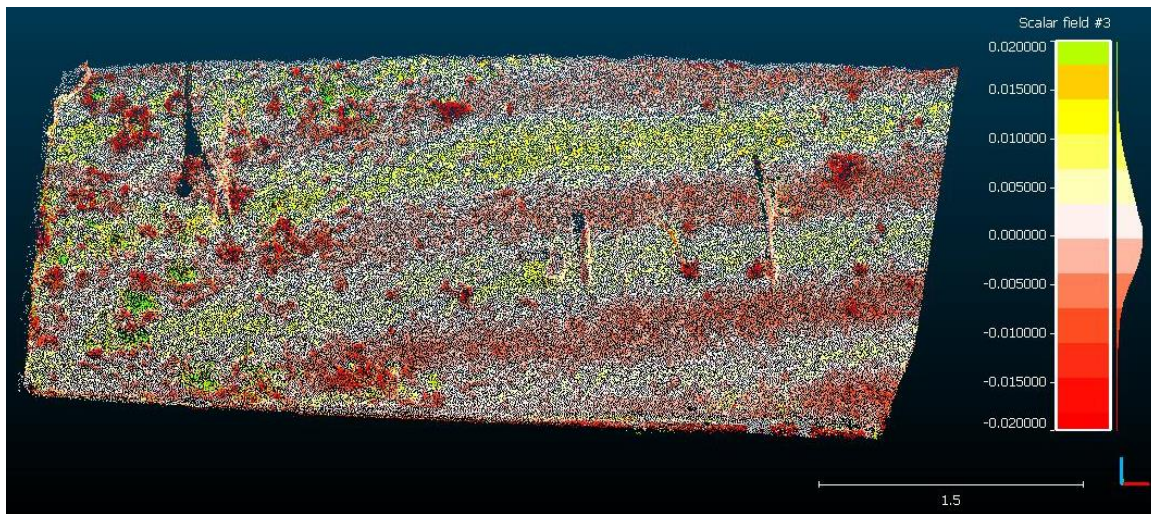


Figura 37. Cambios en un periodo de 88 días entre las fechas del 10 de diciembre del 2018 al 8 de marzo del 2019.

4.3.3 Cálculo de volumen en el talud Norte

El análisis del cambio de volumen se realiza entre imágenes consecutivas en el tiempo para observar su evolución en cada periodo de estudio. El resultado de cada modelo es el volumen removido y volumen acumulado, en el anexo 4, se muestra el cálculo detallado para cada comparación.

El cambio de volumen entre el periodo del 12 de abril al 30 de octubre del 2018 es de menos $0,028 \text{ m}^3$ (Figura 38). Las zonas de aumento o disminución de volumen en forma bandeada coinciden con las zonas de desgaste o acumulación del cálculo de diferencias de distancia. La escala muestra los cambios en la altura del material de $-0,02$ a $0,02 \text{ m}$.

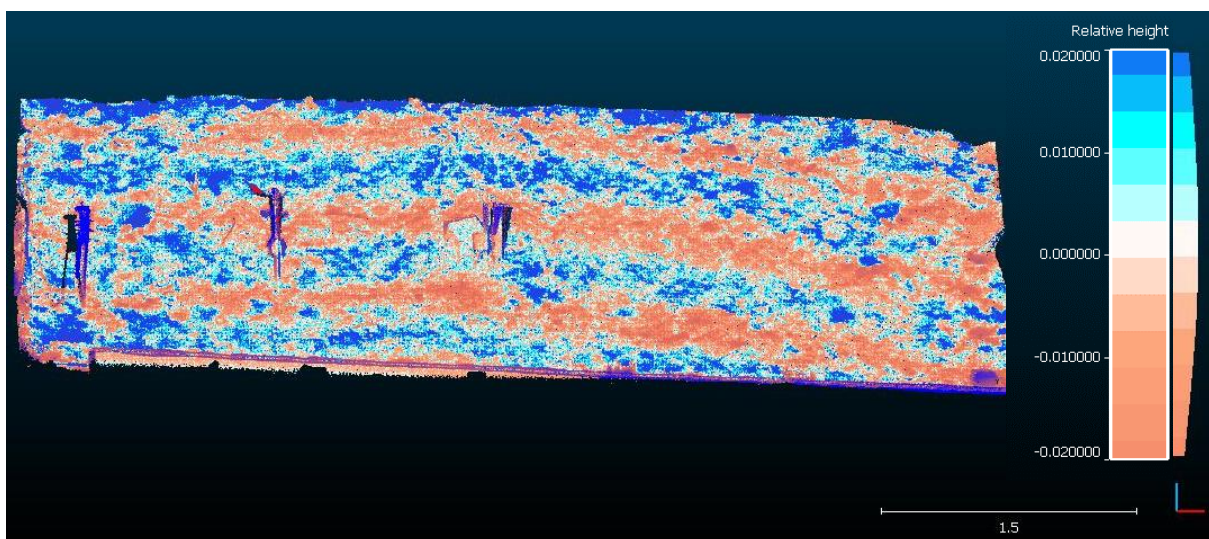


Figura 38. Modelo 3D de diferencias de volumen en el periodo del 12 de abril al 30 de octubre del 2018.

En la Figura 39 el cambio de volumen entre el 30 de octubre al 10 de diciembre del 2018 se observa también se forma bandeada con intercalaciones de disminución y aumento de volumen, que coincide con zonas de desgaste y acumulación de material. En total presentó un $0,003 \text{ m}^3$ menos de volumen.

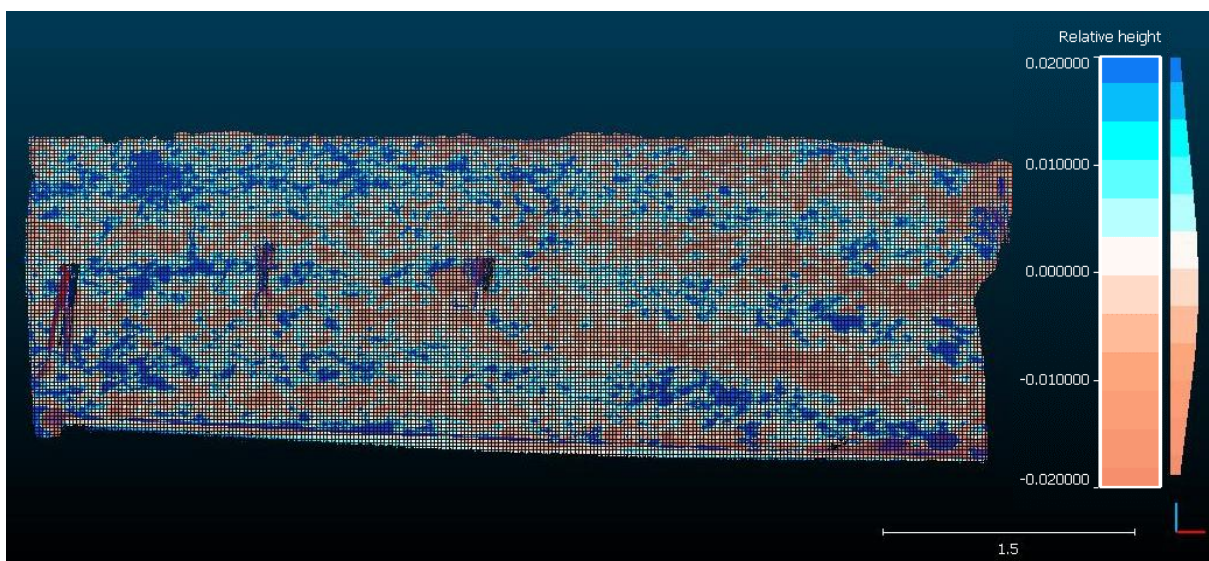


Figura 39. Modelo 3D de diferencias de volumen en el periodo del 30 de octubre al 10 de diciembre del 2018.

El periodo final de estudio del 10 de diciembre del 2018 al 8 de marzo del 2019 se observa con mayor uniformidad la textura bandeada que provoca el cambio de volumen entre acumulación y desgaste de material de $0,033 \text{ m}^3$ (Figura 40).

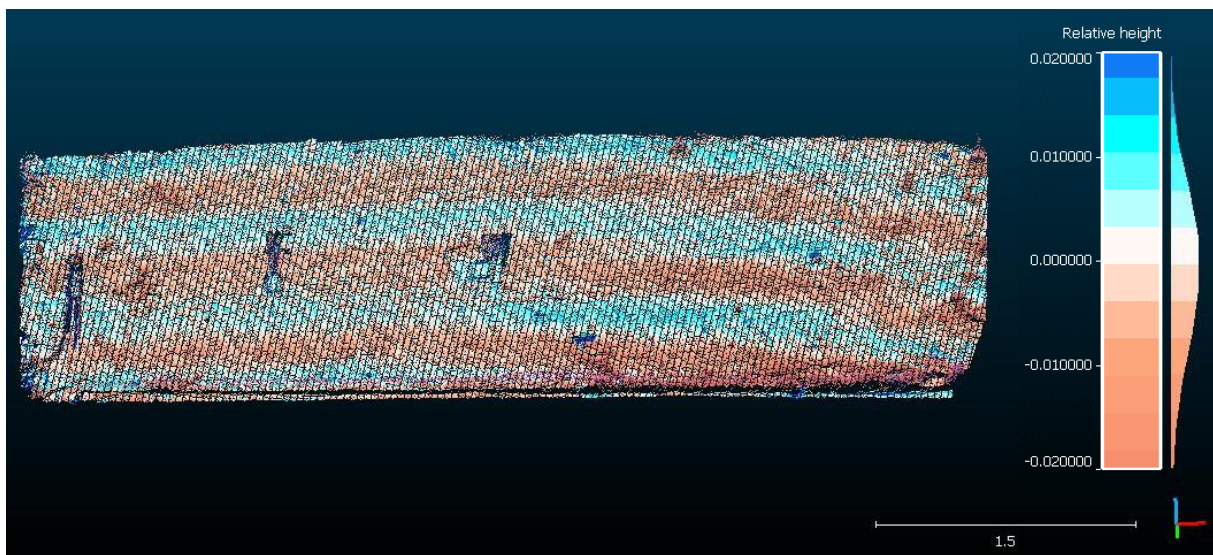


Figura 40. Modelo 3D de diferencias de volumen en el periodo del 10 de diciembre del 2018 al 8 de marzo del 2019.

4.3.4 Cálculo de volumen en el talud Sur

En general, los cambios de volumen del talud sur tienen una textura menos uniforme. La Figura 41, muestra los cambios ocurridos entre el 12 de abril y el 30 de octubre del 2018, con un total de $0,048 \text{ m}^3$ menos de volumen en ese periodo. En el anexo 4, se muestra el cálculo detallado para cada comparación.

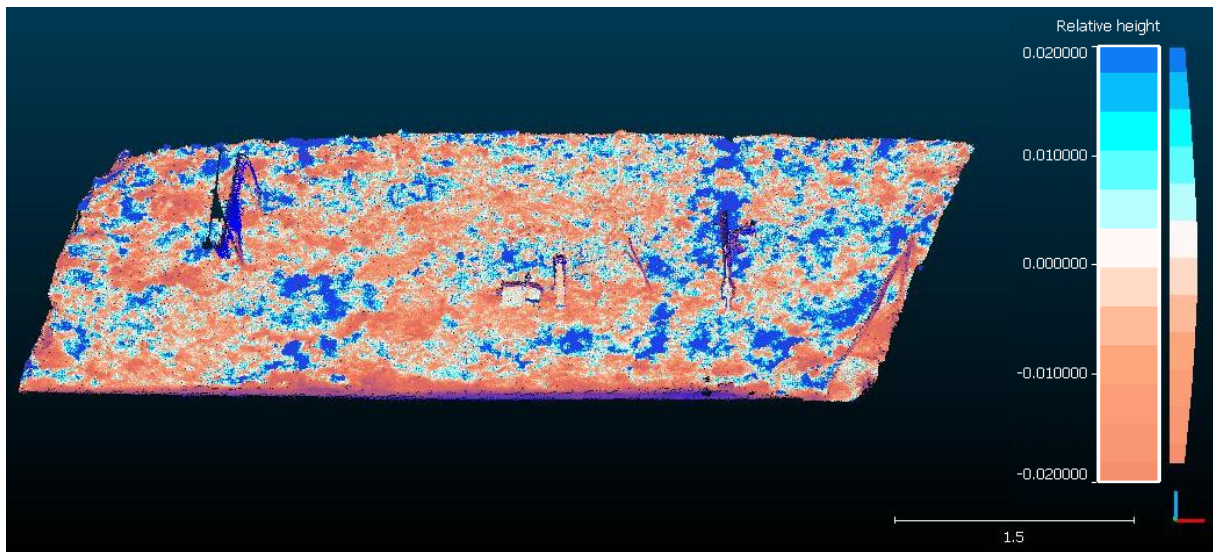


Figura 41. Modelo 3D de la diferencia de volumen del 12 de abril al 30 de octubre del 2018.

En la Figura 42, en el periodo del 30 de octubre al 12 de diciembre del 2018, en el margen izquierdo se observa en un aumento de volumen y en el margen derecho una disminución, sin presentar la textura bandeada. En total presenta 0,035 m³ menos de volumen.

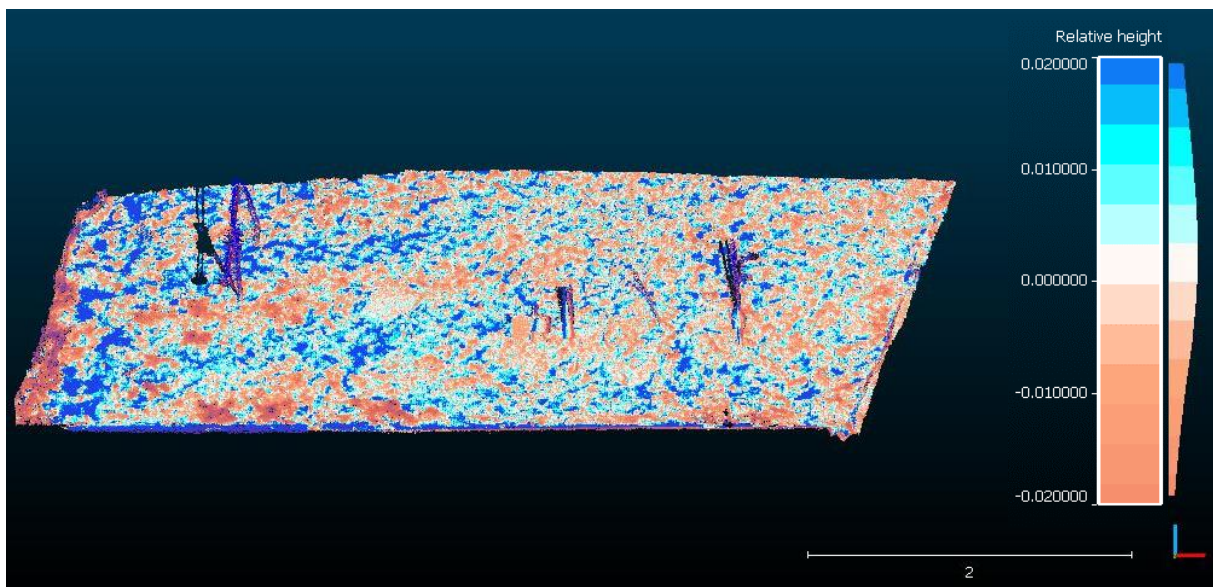


Figura 42. Modelo 3D de la diferencia de volumen del 30 de octubre al 10 de diciembre del 2018.

En la etapa final del 12 de diciembre del 2018 al 8 de marzo del 2019, ocurre el menor cambio de volumen entre todos los periodos, esto consecuencia de la poca precipitación ocurrida entre esas fechas, con un total de $0,01 \text{ m}^3$ menos de volumen (Figura 43).

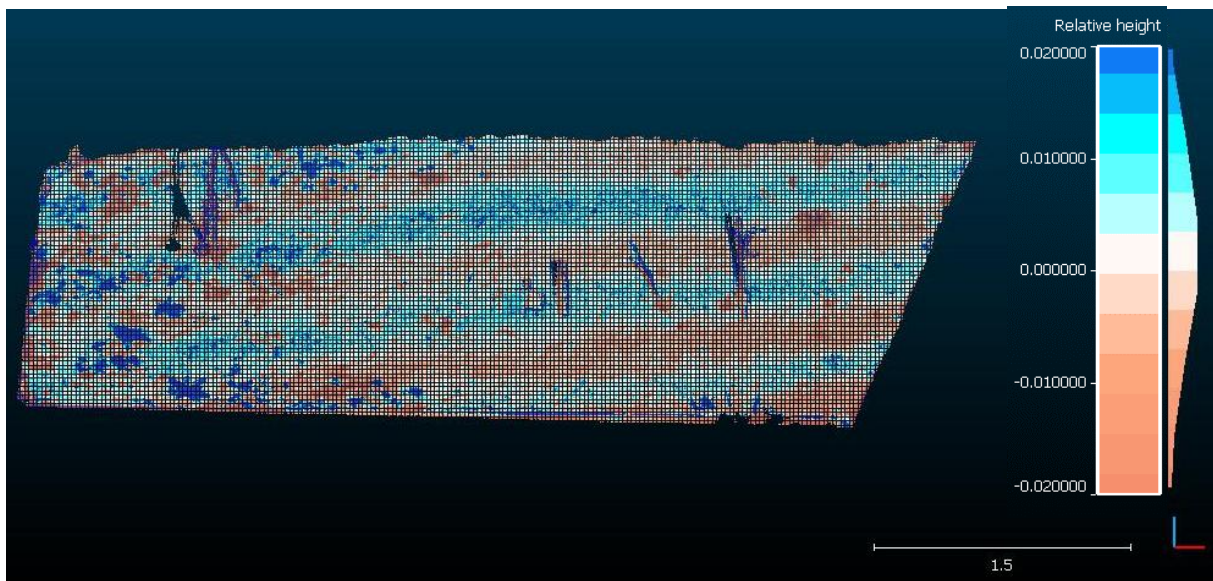


Figura 43. Modelo 3D de la diferencia de volumen del 10 de diciembre al 8 d marzo del 2019.

4.2.5 Comparación general

Se realiza el análisis de comparación entre la primera nube de puntos capturada el 12 de abril del 2018 y la última el 8 de marzo del 2019, para observar los cambios globales que ha tenido el talud norte en todo ese periodo de tiempo. En la Figura 44 se observa el estado inicial y final del talud norte.



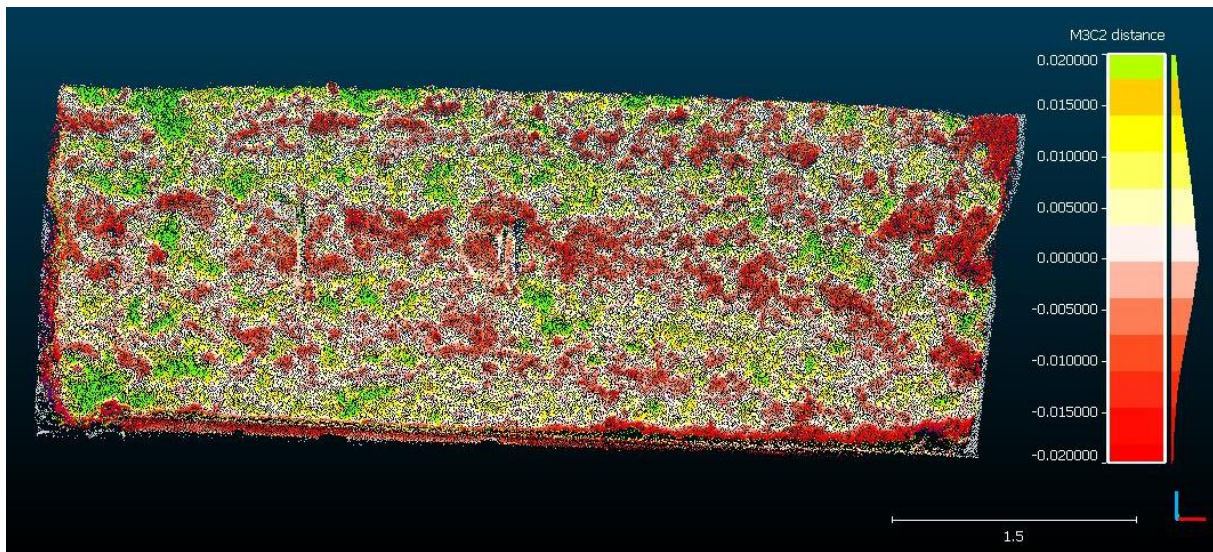
(a)



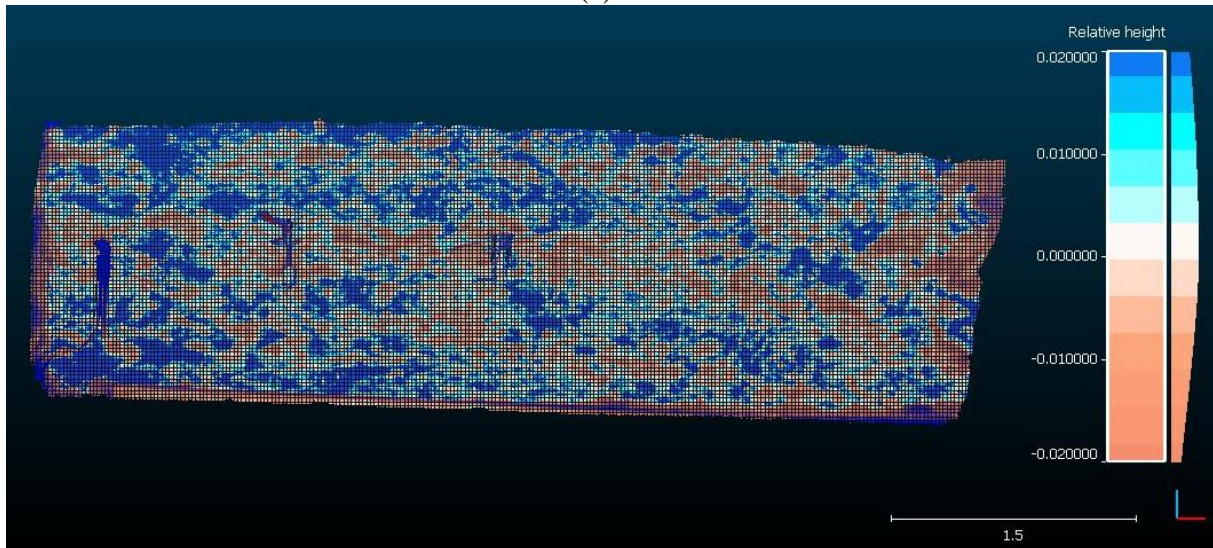
(b)

Figura 44. Talud norte. (a) Estado inicial el 12 de abril del 2018. (b) Estado final el 8 de marzo del 2019.

La diferencia de distancias total para el talud norte se muestra en la Figura 45 a, en general, muestra cambios en textura bandeada menos uniformes, sin embargo, si se identifican las zonas de acumulación y desgaste del material, el cual se observa que cada zona de desgaste tiene inmediatamente su sitio de acumulación. En la Figura 45 b, el cambio de volumen es de menos $0,038 \text{ m}^3$ en el volumen total del talud. Coinciden las zonas de desgaste y acumulación de material con las de aumento y disminución de volumen.



(a)



(b)

Figura 45. Comparación del talud norte entre el 12 de abril del 2018 y el 8 de marzo del 2019. (a) Diferencias de distancias entre nubes de puntos. (b) Cambio de volumen.

Para el talud sur su estado inicial y final se muestra en la Figura 46 a, en la fecha del 12 de abril del 2018 y en la Figura 46 b, el 8 de marzo del 2019. Se observa las diferencias del material superficial, en la primera tiene una textura más uniforme y en la fotografía del estado final se observa exposición de material grueso, lo que indica a erosión de

principalmente los finos, además del crecimiento de vegetación que, al ser retirado, esto genera movimientos en las partículas del suelo, que también se observan en los modelos 3D.



(a)

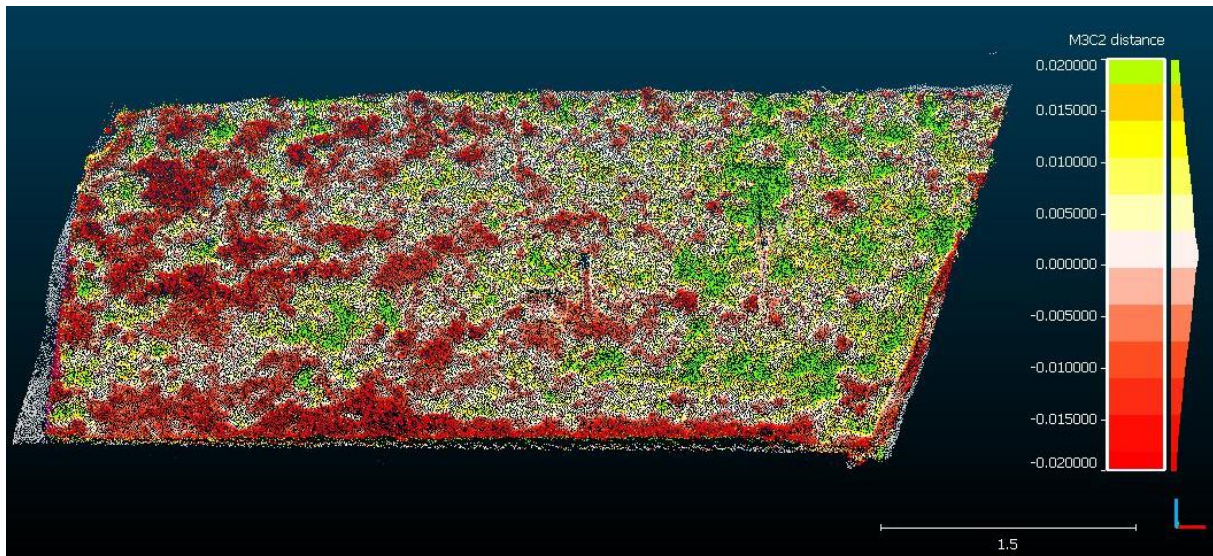


(b)

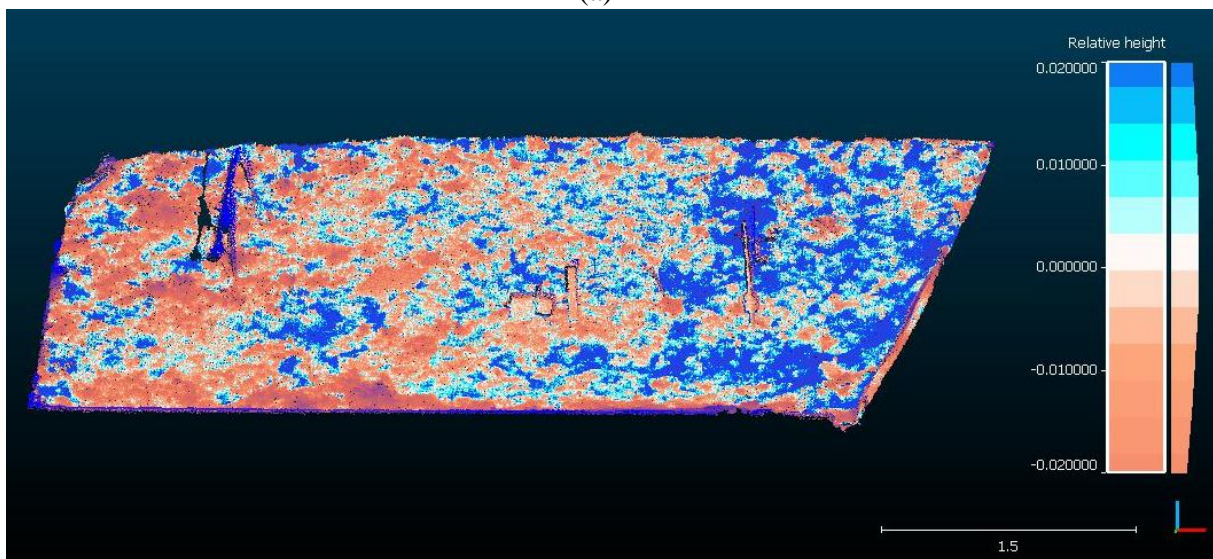
Figura 46. Talud Sur. (a) Estado inicial el 12 de abril del 2018. (b) Estado final el 8 de marzo del 2019.

El talud sur muestra cambios generales con diferencias entre el margen derecho e izquierdo, sin presentar la textura bandeadada. La diferencia de distancias total del talud se muestra en la Figura 47 a, las zonas de desgaste se observan en su mayoría en el lado izquierdo, además del efecto de la erosión, en este sitio en todo el periodo de estudio ha crecido la vegetación y tenido que ser eliminada manualmente, a pesar de los herbicidas

colocados. El crecimiento de raíces mueve las partículas de suelo, por lo tanto, esto implica cambios de hasta 2 cm en esta área. El lado derecho las zonas de acumulación de material puede ser influenciadas por el lado vegetado del talud. En la Figura 47 b, se presentan los cambios de volumen del talud con un total de $0,047 \text{ m}^3$ menos de volumen.



(a)



(b)

Figura 47. Comparación del talud sur entre el 12 de abril del 2018 y el 8 de marzo del 2019.
(a) Diferencias de distancias entre nubes de puntos. (b) Cambio de volumen.

A manera de comprobación del comportamiento bandeado observado en la mayoría de comparación de nubes de puntos en cada periodo de estudio, en la Figura 48, se muestran dos perfiles del talud norte con fecha del 30 de octubre y el 10 de diciembre del 2018, donde se identifican las zonas que ha ocurrido un desgaste o una acumulación del material del talud y de esta forma se explica la textura bandeada. Las distancias verticales entre nubes de puntos son entre 5 mm a 2 cm.

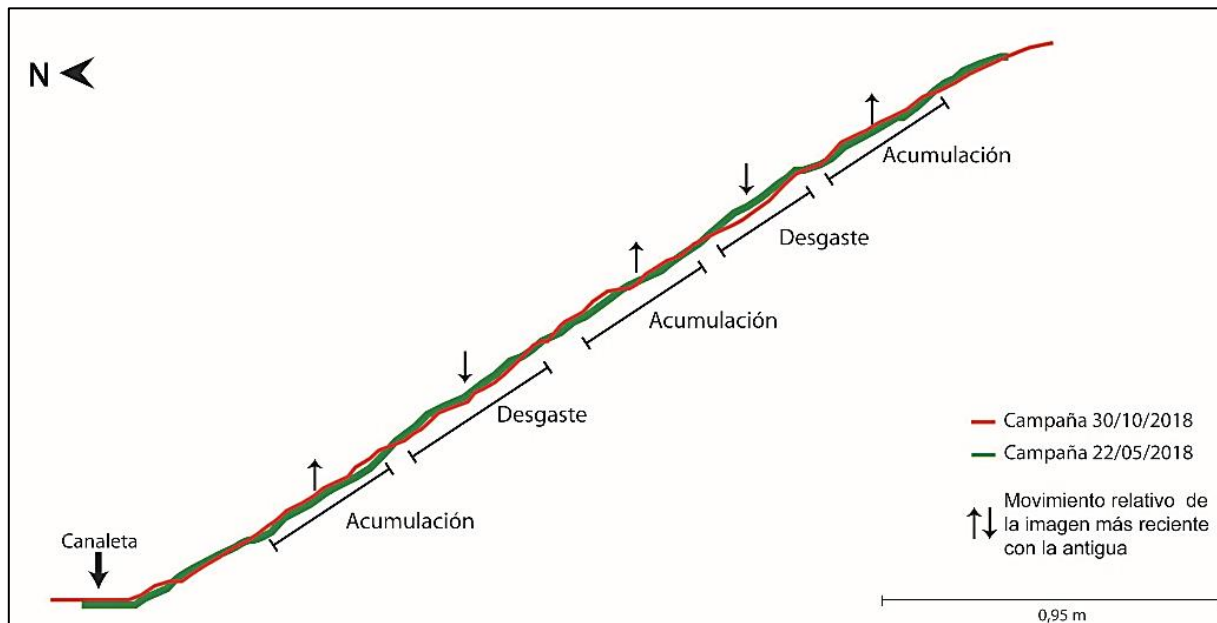


Figura 48. Perfil de comprobación de diferencias de distancias entre nubes de puntos.

En general, en la Tabla 13, se muestra la diferencia entre los datos de volumen obtenidos en el CloudCompare y los obtenidos según los datos de campo. Se espera que los resultados del programa sean mayores que los datos de campos, ya que en este último existen factores que impiden la recolección total del material, por ejemplo el depósito de material dentro de la canaleta, material fino adherido al geotextil o material acumulado que sobrepasa la canaleta, como se observan en Figura 49.

Tabla 13. Comparación datos obtenidos en CloudCompare y los datos de campo

Fecha de inicio	Fecha final	CloudCompare (m ³)		Datos Campo (m ³)	
		N n.V	S n.V	N n.V	S n.V
12/4/2018	30/10/2018	-0,028	-0,048	-0,018	-0,034
30/10/2018	10/12/2018	-0,003	0,035	-0,015	-0,016
10/12/2018	8/3/2019	-0,033	-0,01	-0,002	-0,001
Total		-0,064	-0,023	-0,035	-0,051



Figura 49. Material erosionado no incluido en los datos de campo.

4.4 Modelo de erosión: RUSLE

El modelo se genera para el lado vegetado y para el lado no vegetado en ambas orientaciones. Por lo tanto, el parámetro R de erosividad, el K de erodibilidad del suelo y el

LS que depende de la geometría del talud se mantienen iguales para los dos modelos. El parámetro VM al definir el método de protección o uso del talud, cambia según su cobertura, y se toma en consideración el lado vegetado como un matorral y el lado no vegetado como relleno o terraplén compactado.

La Figura 50, muestra la variación del factor R a lo largo del año, el mes de agosto presentó el mayor valor del erosividad del año en solo un evento de lluvia con una precipitación total de 95,4 mm en 6 horas. En la estación de otoño se observan los meses con los siguientes valores mayores de lluvia, con un total de eventos de lluvia de tres en setiembre, diez en octubre y dos en noviembre. Estos datos coinciden con las predicciones de erosividad de la lluvia anual para Europa, en otoño es la temporada con los valores más altos de erosividad, de acuerdo con Panagos *et al.*, (2016).

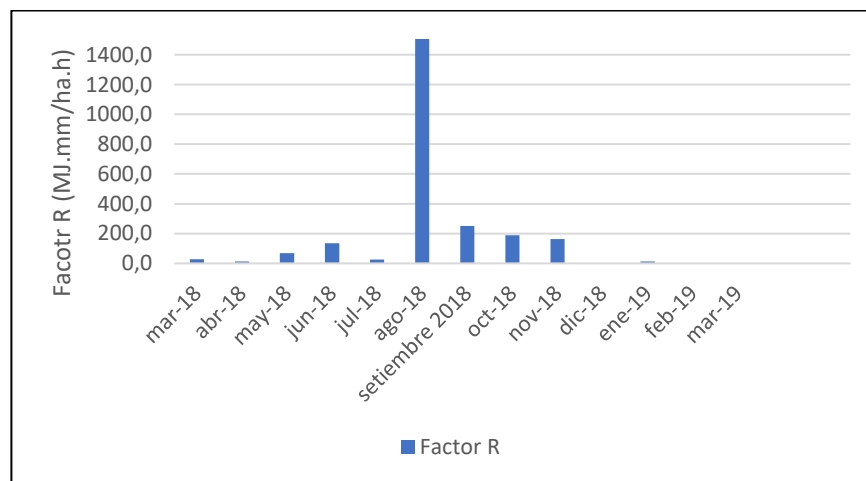


Figura 50. Factor R de erosividad mensual.

Los parámetros seleccionados y la tasa de erosión resultante de acuerdo al modelo RUSLE se observan en la Tabla 14, el talud no vegetado presenta mayor tasa de erosión que

el vegetado, esto como resultado de las diferencias del tipo de cobertura que afectan también al parámetro de erosionabilidad del suelo.

Parámetro	Unidades	Talud Vegetado	Talud No Vegetado
Factor R	(hj.cm/m ² .h)	247,2	247,2
Factor K	(t.m ² .h/ha.hJ.cm)	0,05	0,2
Factor LS	(adimensional)	9,6	9,6
Factor VM	(adimensional)	0,09	0,15
A	(t/ha. año)	10,68	71,19

Tabla 14. Resultados modelos RUSLE.

Tomando en cuenta los resultados calculados a partir de los datos de campo la erosión total anual de los taludes vegetado y no vegetado, resultan de 17,7 y 71,1 t/ha.año, respectivamente. Estos valores se obtienen sumando los valores de cada tipo de talud en las dos orientaciones.

Los resultados de campo y los obtenidos por medio del Cloud Compare coinciden con el modelo de predicción de erosión resultante del RUSLE (Figura 51). Sin embargo, en el lado vegetado, difieren en que el modelo RUSLE no toma en consideración el desarrollo del índice del área foliar, el cual muestra un crecimiento constante hasta su estabilización, lo que explica que se presente mayor tasa de erosión resultante en los primeros periodos de los datos de campo. Además, los resultados del CloudCompare son únicamente para el lado vegetado.

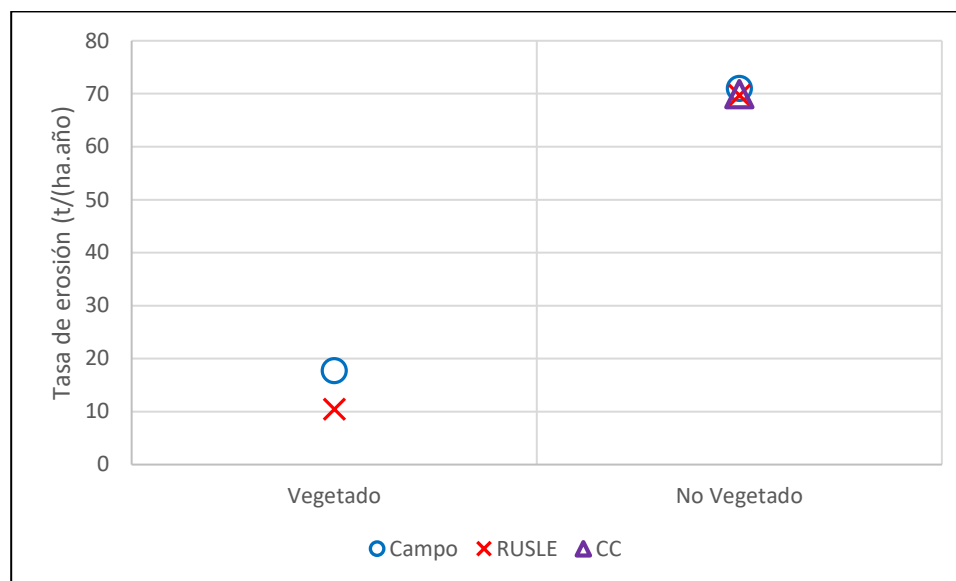


Figura 51. Comparación de resultados de campo, modelo RUSLE, CloudCompare:

Los resultados de la implementación del modelo RUSLE, indican un nivel de erosión moderada baja para el talud vegetado y moderada alta al talud no vegetado, de acuerdo con la calificación de los umbrales de erosión de la Tabla 15 según (Hernando y Romana, 2010).

Tabla 15. Tabla de umbrales de erosión según Hernando y Romano (2010).

Calificación de erosión	Nivel de erosión	Erosión (t/ha.año)
Nula	1	0-5
Ligera	2	5-10
Baja	3	10-25
Moderada baja	4	25-50
Moderada alta	5	50-100
Alta	6	100-200
Muy alta	7	>200

5. CONCLUSIONES

5.1 Auscultación

La auscultación del material erosionado depositado sobre la canaleta indica que principalmente se erosionan las partículas de arenas finas con algunos gruesos en el periodo final, el cual la mayor cantidad de suelo resultó del talud sur no vegetado, y la menor cantidad en el talud norte vegetado.

De acuerdo al análisis de las precipitaciones a lo largo de un año, se observa un comportamiento mayormente erosivo principalmente en entre los meses de agosto y noviembre. La erosión de los taludes presenta una relación directa con la intensidad de los eventos de lluvia, en donde entre mayor sea este parámetro, mayor material erosionado acumula. Por lo tanto, los meses anteriormente indicados se caracterizan por presentar las intensidades de lluvia máximas de 5,6 hasta 65,2 mm/h, lo que implica mayor índice de erosión. Este comportamiento afecta principalmente a los taludes no vegetados, debido a su falta de cobertura que disminuye el efecto de erosividad en el suelo.

En el análisis de los taludes vegetados es importante tomar en cuenta el desarrollo del índice de área foliar, ya que de acuerdo a esto la cantidad de material erosionado se debe al periodo en que la vegetación estaba en crecimiento hasta llegar a establecerse por completo, y como consecuencia la erosión de los taludes disminuye a casi nula.

Se debe destacar que el talud con orientación sur presenta mayor cantidad de sedimento erosionado posiblemente por el efecto de la velocidad del viento, en la cual es mayor de este lado, en comparación con el lado norte que presenta una menor velocidad del viento, de acuerdo con los datos obtenidos por Solà (2019).

5.2 Escáner láser terrestre

La utilización del escáner laser terrestre permitió la modelización en 3D de los taludes no vegetados con una resolución milimétrica. Se observó un comportamiento bandeado de erosión en la mayoría de las imágenes, esto implica un proceso de desgaste y acumulación a lo largo del todo el talud. Se observan cambios mayores en la comparación de las primeras tres nubes de puntos, entre el 12 de abril al 30 de octubre y de este último al 10 de diciembre del 2018. Para el periodo del 10 de diciembre al 2018 al 8 de marzo del 2019, los cambios entre nubes de puntos son mínimos.

El cálculo del cambio de volumen entre imágenes muestra también la textura bandeadada de aumento y disminución del volumen correspondiendo a los cambios en el cálculo de distancias. En general, los resultados de los modelos 3D muestran un volumen erosionado mayor en comparación con los datos de campo, esto se debe a que en los datos obtenidos en campo hay material que no es tomado en consideración por razones como: el material se acumula dentro de la canaleta, se adhiere al geotextil o rebaza la canaleta y cae a la parte inferior del talud.

5.3 Modelo de erosión

Con la implementación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada, se obtiene el parámetro de erosividad de la lluvia que afecta el terraplén y este coincide con los valores esperados según el mapa de erosividad de la lluvia europeo con un valor mayor a 1200 MJ.mm./ha.año. El mes con mayor erosividad fue el mes de agosto del 2018 y los valores menores fueron del diciembre del 2018 a marzo del 2019.

La tasa de erosión según el cálculo RUSLE corresponde con mayor valor para el talud no vegetado y menor valor para el talud vegetado, ya que se diferencian en el parámetro de cobertura del talud y erosionabilidad del suelo. De acuerdo a los umbrales de pérdida de suelo propuestos por Hernando y Romano (2010), el talud vegetado presenta un nivel de erosión de moderada baja y el talud no vegetado un nivel de moderada a alta. Este resultado corresponde con el mismo orden de magnitud de los resultados con los datos de campo.

5.4 Recomendaciones

Para continuar con la investigación sobre la tasa de erosión entre periodos, se recomienda realizar un cronograma con periodos constantes para la comparación entre ellos.

Debido a que las dos orientaciones del talud presentan diferentes tasas de erosión bajo las mismas condiciones de lluvia, es posible implementar dentro del modelo empírico el índice de erosión eólica, para obtener el factor de erosividad y calcular su efecto en el talud.

Se sugiere sellar de manera permanente el geotextil a la canaleta para que el material erosionado no lo atraviese y así sea depositado en su totalidad sobre de la canaleta, con el fin de obtener datos más cercanos a la cantidad de sedimentos real erosionado.

Además, se recomienda el riego constante con herbicidas para disminuir a nulo el crecimiento de vegetación en el talud no vegetado y así evitar los movimientos en las partículas de suelo cuando se eliminan las plantas, que pueden cambiar las condiciones del talud.

BIBLIOGRAFÍA

- Alatorre, L. C. y Beguería, S. (2009). Los modelos de erosión: una revisión. *Rev. C. y G.*, 23 (1-2), 29-48.
- Angulo, M., y Beguería, S., (2009). Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology* 379 (2009) 111–121.
- Azañón, J.M., y Lamas, F. (2015). *Nuevas Metodologías para el análisis de estabilidad de taludes en infraestructuras lineales*. Universidad de Granada y EIFFAGE. – 669 p.
- Comisión Europea., (2006). Estrategia temática de suelos de la Comisión Europea. Recuperado de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISSUM%3A128181>
- Cevallos, A. (2017). *Construcción e instrumentación de un terraplén experimental para el estudio de la interacción atmósfera-vegetación-suelo*. Trabajo de Fin de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- FAO (2016). Estado Mundial del recurso suelo. *Resumen Técnico. ROMA*. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>
- González, J.C., Arrillaga, M. de Luís. y Peña., J.L. (2005). Los eventos extremos de precipitación, la variabilidad del clima y la erosión del suelo. Reflexiones ante el cambio del clima en los sistemas mediterráneos. *Rev. C. y C.*, 19 (1-2), 49-62.
- Guachizaca Contento, V. F. (2018). *Análisis de las interacciones suelo-vegetación-atmósfera en un talud experimental*. Trabajo de Fin de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Jafari, B., Khaloo, Al. y Lattanzi, D. (2017). Deformation Tracking in 3D point clouds via statistical sampling of direct cloud to cloud distances. *J Nondestruct Eval* (2017) 36:65. <https://doi.org/10.1007/s10921-017-0444-2>
- Navarro, J. (2002). *Control de la erosión en desmontes originados por obras de infraestructura viaria: Aplicación al entorno de Palencia capital*. Tesis Doctoral.

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid, España

Lague, D., Brodu, N, y Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Volume 82, August 2013*, 10-26. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>

Oorthuis,, Raul. (2016). *Diseño de Un Experimento a Gran Escala Para Estudiar El Efecto de Las Interacciones Suelo-Vegetación- Atmósfera En Laderas*. Trabajo de Fin de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Oorthuis, R., Hürlimann, M., Fraccica, A., Lloret, A., Moya, J., Puig-Polo, C., y Vaunat, J. (2018). Monitoring of a Full-Scale Embankment Experiment Regarding Soil–Vegetation–Atmosphere Interactions. *Water*, 10(6), 688.doi:10.3390/w10060688.

Panagos, P., Borrelli, P., Spinoni, J., Ballabio, C., Meusburger, K., Beguería, S., Klik, A., Michaelides, S., Petan, S., Hrabalíková, M., Olsen, P., Aalto, J., Lakatos, M., Rymaszewicz, A., Dumitrescu, A., Tadic, M.P., Diodato, N., Kostalova, J., Rousseva, S., Banasik, K. Alewell, C. (2016). Monthly rainfall erosivity: conversion factors for different time resolutions and regional assessments. *Water*,8(4), No 119.

Pastorello, R., Hurlimann, M., y D´Agostino, V. (2018). Correlation between the rainfall, sediment recharge, and triggering of torrential flows in the Rebaixader catchment (Pyrenees, Spain). *Landslides (2018)* 15:1921–1934. DOI 10.1007/s10346-018-1000-6.

Pimentel, D., 2006. Soil erosion: a food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability* (2006) 8: 119–137 DOI 10.1007/s10668-005-1262-8.

Regües, D., y Torri, D. (2002). Rainfall kinematics energy effect on physical properties dynamics and crusting of a clayey bare soil. *Rev. C. y G.*, 16 (1-4), 57-71.

Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, and D.C. Yoder, coordinators. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the

Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture, *Agriculture Handbook No. 703*, 404 pp.

Slope Mass-wasting under climate change, SMuCPhy (2017). Slope Mass-wasting under climate change. Physical mechanisms, predictive modelling and possible mitigation strategies. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Se encuentra en: <https://smucphy.upc.edu/en/summary-resumen>

Solà, I. (2019). *Análisis numérico de la interacción suelo – atmosfera en un terraplén experimental*. (Trabajo de Fin de Máster inédito). Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Velásquez, A. (2019). *Análisis de la infiltración, escorrentía y erosión superficial en un talud experimental*. Trabajo de Fin de Máster. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

ANEXOS

Anexo 1: Humedad natural

Equipo

Muestra de suelo

Recipientes metálicos

Guantes

Balanza (precisión 0,01 g)

Horno de secado industrial (temperatura $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$).

Procedimiento

1. Se toma una muestra representativa del suelo en campo. Se debe guardar en la cámara húmeda para evitar pérdidas o absorción de humedad. Se puede tomar entre 10 a 100 gramos de suelo.
2. Se pesa recipiente sin la muestra (Peso tara).
3. Se coloca la muestra húmeda en el recipiente y se pesa (Peso tara + suelo húmedo).
4. Se coloca el recipiente con la muestra de suelo dentro del horno por 24 horas.
5. Se pesa el recipiente con la muestra seca (Peso tara + suelo seco).

Cálculo

$$w(\%) = \frac{(\text{Peso tara} + \text{suelo húmedo}) - (\text{Peso tara} + \text{suelo seco})}{(\text{Peso tara} + \text{suelo seco}) - (\text{Peso tara})} * 100$$

Anexo 2: Granulometría

Equipo

Bandejas

Balanza (precisión 0,01 g)

Horno de secado industrial (temperatura $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$).

Mazo de goma

Serie de tamices según Tabla 16.

Tabla 16. Número y abertura de tamices según ASTM.

Nº de Tamiz	Abertura (mm)
1"	25
3/4"	19
1/2"	1,5
3/8"	9,5
4	4,76
10	2
20	0,85
40	0,425
60	0,25
100	0,15
200	0,075

Procedimiento

1. Separar aproximadamente 500 gramos de la muestra tomada en campo y secarla al horno.
2. Desintegrar lo aglomerados de material en una cubeta de goma con un mazo de goma.

3. Se debe separa el material retenido en el tamiz No 4 para la parte gruesa y de lo que pasa se adquiere de 100 a 500 gramos.
4. Para parte retenida en la No 4. Se procede con la granulometría, pesando el material retenido en cada tamiz.
5. Para parte que pasa el No 4, se pesa el material seco antes de lavarlos. Lavar material en el tamiz 200 debajo del grifo, evitando que el material rebose por arriba, hasta que el agua salga limpia.
6. Poner el material en una bandeja y meter al horno durante 24 horas $\pm 105^{\circ}$.
7. Pesas material seco y proceder con la granulometría, pesando el material retenido en cada tamiz

Anexo 3: Datos generales de precipitaciones

Tabla con los cálculos de los datos mínimos y máximos de los parámetros obtenidos de las precipitaciones.

Tabla 17. Datos mínimos y máximos de los parámetros de las precipitaciones

Mes	Año	Periodo	# evento	Lluvia total	Duración (h)	B	C	D	E	F	G
marzo	2018		1	28,6	20,9	6,8			4,0		
abril	2018		2	4,6	1,0	8,8			0,9		
abril	2018		3	9,2	5,7	4			1,4		
abril	2018		4	9	2,2	5,2			1,6		
abril	2018		5	7,8	4,3	5,6			1,2		
mayo	2018		6	22,2	5,3	15,2			4,2		
mayo	2018		7	4,4	1,8	5,2			0,7		
junio	2018	1	8	28	4,3	14,8	65,2	4	5,6	0,7	24,1
junio	2018		9	12,2	2,3	20			2,6		
julio	2018		10	8,4	1,0	15,2			1,7		
agosto	2018		11	95,4	6,0	65,2			24,1		
setiembre	2018		12	27	1,8	32			6,2		
setiembre	2018		13	4,8	2,2	5,6			0,8		
setiembre	2018		14	11,8	1,4	19,2			2,5		
octubre	2018		15	10,4	0,6	20,4			2,4		
octubre	2018		16	15,4	5,6	7,6			2,6		
octubre	2018		17	6,4	1,6	5,6			1,1		
octubre	2018		18	6,6	1,2	8			1,2		
octubre	2018	2	19	19,4	6,5	6,8	8,4	4,4	3,2	1,1	3,2
octubre	2018		20	10	6,2	4,4			1,4		
octubre	2018		21	14,6	6,5	8,4			2,4		
octubre	2018		22	17,4	6,9	8,4			3,0		
octubre	2018		23	12,6	4,4	8			2,1		
octubre	2018	3	24	5,6	0,5	11,2	24,4	8	1,2	1,2	5,3
noviembre	2018		25	9,4	1,0	16,4			2,0		
noviembre	2018		26	24,6	3,4	24,4			5,3		
enero	2019	4	27	4,7	3,0	1,7	3,45	1,7	0,6	0,6	3,4
enero	2019		28	25	14,0	3,45			3,4		

Los parámetros son los siguientes:

B= Intensidad máxima del evento (mm/h)

C= Intensidad máxima del periodo (mm/h)

D= Intensidad mínima del periodo (mm/h)

E= Energía cinética evento (MJ/ha)

F= Energía cinética mínima del periodo (MJ/ha)

G= Energía cinética máxima del periodo (MJ/ha)

Anexo 4: Cálculo de Volumen

El cálculo de cambio de volumen entre campañas presenta las siguientes características:

Tabla 18. Datos de cálculo de volumen talud norte.

22/04/2018 -30/10/2018	<div> <p>Volume: -0.028 Surface: 8.992</p> <hr/> <p>Added volume: (+)0.089 Removed volume: (-)0.117</p> <hr/> <p>Matching cells: 95.4% Non-matching cells: ground = 2.4% ceil = 2.2% Average neighbors per cell: 7.9 / 8.0</p> </div>
30/10/2018 – 10/12/2018	<div> <p>Volume: -0.003 Surface: 10.770</p> <hr/> <p>Added volume: (+)0.076 Removed volume: (-)0.079</p> <hr/> <p>Matching cells: 96.6% Non-matching cells: ground = 2.9% ceil = 0.5% Average neighbors per cell: 7.9 / 8.0</p> </div>
10/12/2018 – 8/03/2019	<div> <p>Volume: -0.033 Surface: 9.232</p> <hr/> <p>Added volume: (+)0.031 Removed volume: (-)0.065</p> <hr/> <p>Matching cells: 97.3% Non-matching cells: ground = 1.7% ceil = 0.9% Average neighbors per cell: 8.0 / 8.0</p> </div>
22/04/2018 – 8/03/2019	<div> <p>Volume: -0.038 Surface: 9.763</p> <hr/> <p>Added volume: (+)0.099 Removed volume: (-)0.138</p> <hr/> <p>Matching cells: 96.2% Non-matching cells: ground = 2.5% ceil = 1.2% Average neighbors per cell: 7.9 / 8.0</p> </div>

Tabla 19. Datos de cálculo de volumen talud sur.

22/04/2018 -30/10/2018	<div> Volume: -0.048 Surface: 8.493 ----- Added volume: (+)0.077 Removed volume: (-)0.125 ----- Matching cells: 94.6% Non-matching cells: ground = 2.8% ceil = 2.6% Average neighbors per cell: 7.9 / 8.0 </div>
30/10/2018 – 10/12/2018	<div> Volume: 0.035 Surface: 8.138 ----- Added volume: (+)0.093 Removed volume: (-)0.058 ----- Matching cells: 94.1% Non-matching cells: ground = 2.1% ceil = 3.8% Average neighbors per cell: 7.9 / 8.0 </div>
10/12/2018 – 8/03/2019	<div> Volume: -0.010 Surface: 8.188 ----- Added volume: (+)0.046 Removed volume: (-)0.055 ----- Matching cells: 96.4% Non-matching cells: ground = 2.1% ceil = 1.4% Average neighbors per cell: 7.9 / 8.0 </div>
22/04/2018 – 8/03/2019	<div> Volume: -0.047 Surface: 8.309 ----- Added volume: (+)0.099 Removed volume: (-)0.146 ----- Matching cells: 96.0% Non-matching cells: ground = 1.8% ceil = 2.1% Average neighbors per cell: 7.9 / 8.0 </div>